

Modellierung und Simulation des europäischen Linien-Luftverkehrs

**Bachelorarbeit im Modul Grundlagen der Verkehrssystemplanung
und Verkehrsinformatik**

eingereicht von:

Björn Sören Fürbas
Lichtenrader Damm 203 B
12305 Berlin
Matrikelnummer: 313267

Gutachter:

Prof. Dr. Kai Nagel
Dipl.-Inf. Dominik Grether
Technische Universität Berlin
Institut für Land- und Seeverkehr
Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

Berlin, 04.03.2011

Die selbständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Björn Sören Fürbas

Zusammenfassung

Der Luftverkehr verzeichnete in den letzten Jahrzehnten enorme Wachstumsraten und gewann bedeutend an Relevanz als massenleistungsfähiger Verkehrsträger. Um den Luftverkehr in die bereits existierende, multi-modale Multiagenten-Simulation MATSim integrieren zu können ist es nötig eine geeignete Modellierung zu konzipieren, die das Treffen von Aussagen über den Verkehrsfluss oder die Luftverkehrsnachfrage ermöglicht.

Hierzu wird zu Anfang die Eignung verschiedener Quellen für Luftverkehrsdaten diskutiert, geeignete Quellen ausgewählt und schließlich ein Flugplan und ein Netzwerk für eine Simulation in MATSim erzeugt. Die Infrastruktur in der Luft wird auf direkte Verbindungen zwischen Start- und Zielflughafen simplifiziert. Eine Kapazitätsbeschränkung findet ausschließlich im Bereich der Flughäfen statt. Die so modellierte Infrastruktur wird in MATSim umgesetzt und eine Simulation des Luftverkehrs durchgeführt.

Das Modell simuliert mehr als 15000 europaweiten Flügen zu über 450 Flughäfen. Durch die getroffenen Beschränkungen der Kapazität ist das Modell in der Lage Engpässe abzubilden, die in einer Verspätungsquote von 9% resultieren. Die Ausprägung von Verkehrsspitzen am frühen Morgen und am späten Nachmittag wird ebenfalls deutlich.

Dieser Ansatz bildet die Grundlage für die Generierung einer Luftverkehrsnachfrage und der anschließenden Simulation und Vergleich des Flugverkehrs mit anderen Verkehrsträgern.

Abstract

Air traffic has denoted tremendous growth rates over the past decades, resulting in an increased relevance as mode of mass transportation. In order to integrate air traffic into the already existing, multi-modal, agent-based traffic simulation MATSim an adequate modeling for the evaluation of traffic flow and demand needs to be drafted.

For this purpose sources of air traffic data are evaluated and a flight schedule and an air network are created from suitable sources. The air network consists of direct links between origin and destination in order to simplify the infrastructure. Capacity constraints are applied on aerodromes only. A simulation of European air traffic has been implemented using this model.

The model is capable of simulating some 15000 flights to and from more than 450 European airports. The adopted constraint of capacity enables the simulation to reproduce traffic bottlenecks, resulting in a delay proportion of 9%. An occurrence of traffic peaks in the early morning and the late afternoon can also be observed. This model establishes the basis for an air traffic demand generation and an adjacent simulation of air traffic that allows a comparison of air traffic to other modes of transport.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Einleitung	1
2	Einführung in die Luftverkehrsthematik	3
2.1	Definitionen und Grundbegriffe	3
2.2	Charakteristika des Luftverkehrs	4
2.2.1	Eigenschaften des Produkts und der Nachfrage	4
2.2.2	Funktionen des Luftverkehrs	6
2.2.3	Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern	7
2.2.4	Umweltbelastungen durch den Luftverkehr	8
2.3	Wichtige Institutionen und Verbände	9
2.3.1	ICAO	9
2.3.2	IATA	10
2.3.3	Europäische Luftverkehrsverwaltung	11
2.3.4	Nationale Luftverkehrsverwaltung	12
2.4	Flugplatzkategorien	13
2.4.1	Flugplätze	13
2.4.2	Flughäfen	13
2.4.3	Landeplätze	14
2.4.4	Segelfluggelände	14
2.5	Luftraum- und Luftstraßenstruktur	14
2.6	Verkehrsarten	17
2.6.1	Flüge nach Sichtflugregeln	17
2.6.2	Flüge nach Instrumentenflugregeln	17
2.6.3	Linienflugverkehr	17
2.6.4	Gelegenheitsverkehr	18
2.7	Verkehrsstatistiken	19
2.7.1	Flugbewegungen	19
2.7.2	Passagierzahlen, Passagierkilometer, Auslastung	19
2.7.3	Wachstumsprognosen	19

3	Die agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim	21
3.1	Überblick: Funktionalität von MATSim	21
3.2	Das Public Transport Modul in MATSim	22
3.2.1	Network	23
3.2.2	Controler, ControlerListener und EventHandler	23
3.2.3	Public Transport Vehicles	23
3.2.4	Public Transport Schedule	24
3.2.5	Konfigurationsdatei	25
4	Analyse von Datenquellen für Flugbewegungen und Flughäfen	27
4.1	Flugbewegungen	27
4.1.1	ICAO	27
4.1.2	IATA	28
4.1.3	Airline-Flugpläne	28
4.1.4	Airport-Flugpläne	28
4.1.5	Statistisches Bundesamt	29
4.1.6	CFMU	29
4.1.7	Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025	29
4.1.8	Global Distribution Systems und das KVS Tool	30
4.1.9	OAG Aviation	30
4.1.10	Auswahl der Datenquelle für Flugbewegungen	31
4.2	Flughafendaten	31
4.2.1	Static Info Tables Airports im TYPO3 Extension Repository	32
4.2.2	Great Circle Mapper	32
4.2.3	Aeronautical Information Publication (AIP)	32
4.2.4	OpenStreetMap	33
4.2.5	Auswahl der Datenquelle für Flughafendaten	35
5	Modellierung und Simulation des europäischen Linien-Luftverkehrs	36
5.1	Rahmenbedingungen	36
5.2	Erstellung der Flugbewegungs-Datenbank	37
5.3	Erstellung des Luftverkehrsnetzwerks	38
5.4	Implementierung in JAVA	41
5.4.1	Erstellung der Flughafendatenbank	41
5.4.2	Erstellung der Flugbewegungsdatenbank	41
5.4.3	Entwurf einer Airport-Klasse in MATSim	43
5.4.4	Erstellung des Netzwerks	44
5.5	Erstellung der Eingangsdaten für die PT-Simulation	45

6	Verkehrssimulation	48
6.1	Durchführung der Simulation	48
6.2	Ergebnisse der Simulation	48
7	Diskussion und Ausblick	51
	Literaturverzeichnis	i
	Abbildungsverzeichnis	viii
	Tabellenverzeichnis	ix
A	Anhang	x
a	Nicht in OSM enthaltene Flughäfen (europaweit)	xi
b	Nicht in OSM enthaltene Flughäfen (Deutschland)	xiii
c	Exemplarischer Ablauf anhand von Events: Flug LX0967 von Berlin nach Zürich	xiv

Glossar

ATC *Air Traffic Control* – Flugsicherung

ATS *Air Traffic Services* – Flugsicherungsdienste

BMVBS Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

CFMU *Cetral Flow Management Unit* – Abteilung für Verkehrsflusssteuerung der EUROCONTROL

Codesharing Marketingabkommen zwischen zwei Fluggesellschaften, bei dem derselbe Flug von mehreren Fluggesellschaften jeweils unter der eigenen Flugnummer vermarktet wird. Die ausführende Fluggesellschaft (*operating carrier*) stellt dem Codesharing-Partner Sitzplätze zum Verkauf zur Verfügung, die vom Codesharing-Partner mit einer eigenen Flugnummer belegt werden. Der Codesharing-Partner wird auch als *marketing carrier* bezeichnet [69, S. 279].

destatis Statistisches Bundesamt Deutschland

DFS Deutsche Flugsicherung

Emissionen Menge der Stoffe, Strahlen oder Schallwellen, die von einer bestimmten Quelle ausgehen [69, S. 70]

EUROCONTROL Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt

Flugnummer Die Flugnummer setzt sich zusammen aus *Airline Designator* und *Flight Number*, die zusammen den *Flight Designator* ergeben. Im Deutschen ist Flugnummer für *Flight Number* und *Flight Designator* gebräuchlich [63, S. 139].

GDS Global Distribution Systems – Weltweite Reservierungssysteme, die Buchungen und Verfügbarkeitsanfragen von Flügen, Hotels, Mietwagen usw. ermöglichen – auch Computer-Reservierungssystem (CRS)

IATA *International Air Transport Association*

ICAO *International Civil Aviation Organization*

Immisionen Auswirkung von Emissionen auf Menschen, Natur und Gebäude [69, S. 70]

LBA Luftfahrt-Bundesamt

LF *Load Factor* – Sitzladefaktor – $LF = \frac{RPK}{SKO} * 100$

Low Cost Carrier Fluggesellschaft mit günstiger Kostenstruktur, die ihre Tickets in der Regel zu geringen Einstiegspreisen anbietet. Bekannte Low Cost Carrier in Europa sind zum Beispiel Ryanair, Easyjet und Air Berlin [69, S. 239f].

LV Luftverkehr

MIV Motorisierter Individualverkehr

Network Carrier Netzwerkfluggesellschaft, die in der Regel ein weltweites Streckennetz mit Umsteigeverbindungen und Drehkreuze betreibt. Die größten Netzwerkfluggesellschaften in Europa sind die Deutsche Lufthansa, Air France/KLM und British Airways [69, S. 232f].

ÖStPV Öffentlicher Straßenpersonenverkehr

ÖPNV Öffentlicher Personennahverkehr

ÖV Öffentlicher Verkehr

Passagierkilometer Anzahl der beförderten Passagiere multipliziert mit der Distanz der Beförderung

Pkm Passagierkilometer – im Luftverkehr auch RPK

RPK *Revenue Passenger Kilometers* – Passagierkilometer

SKO *Seat Kilometers Offered* – Angebotene Sitzkilometer

Slot Zeitfenster für den Start und die Landung

Tkm Tonnenkilometer

Kapitel 1

Motivation und Einleitung

Der europäische Luftverkehr hat seit der Liberalisierung in den 1990-er Jahren und den damit verbundenen Preissenkungen enorme Wachstumsraten verzeichnen können – insgesamt hat sich das Luftverkehrsaufkommen seitdem mehr als verdoppelt.

Mit einer steigenden Zahl von Flugbewegungen erhöhen sich gleichzeitig die Anforderungen an die zu Grunde liegende Infrastruktur, die ein sich ständig vermehrendes Aufkommen bewältigen muss. Große Verkehrsflughäfen stoßen zunehmend an ihre Grenzen, die Folge sind Verspätungen. Auch die Überlastung einzelner Luftraumsektoren kann zu Verspätungen führen, wenn die kürzeste Route vom Start zum Ziel durch einen solchen Sektor führt. Die Alternative wäre ein Umweg. Dieser führt im Vergleich mit einem Flug auf direktem Wege zu einem höheren Treibstoffverbrauch. Hieraus resultieren wiederum höhere Kosten für die Fluggesellschaft einerseits, sowie in ein höherer Emissionsausstoß – mit entsprechenden Belastungen für die Umwelt – andererseits. Um dies zu verhindern muss eine effiziente Nutzung des Luftraums gewährleistet werden [58]. Die Voraussage der benötigten Kapazität einzelner Streckenabschnitte im Luftraum könnte mittels einer Simulation des Luftverkehrs erreicht werden, die auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbaut. Ebenso ist die Ermittlung externer Kosten denkbar, die durch Emissionen aus dem Flugverkehr entstehen.

In Hinblick auf die enormen Wachstumsraten hat auch die Relevanz des Luftverkehrs im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern deutlich zugenommen und wird dies nach aktuellen Wachstumsprognosen auch weiterhin tun. Im Rahmen einer Analyse von Verkehrsverflechtungen ist es deshalb zweckmäßig, den Luftverkehr mit einzubeziehen. Eine Simulation von Straßen- und öffentlichem Verkehr ist mit der agentenbasierten Verkehrssimulation MATSim bereits realisiert worden [65]. Zur Analyse des Gesamtsystems sollte die Simulation von Flugverkehr in MATSim integriert werden. Dies ließe zukünftig einen Vergleich anderer Verkehrsträger – etwa der Bahn – mit dem Flugverkehr zu. Weiterhin würde die Nutzbarkeit multi-modaler Fahrten erweitert, sodass Umstiege zwischen Auto, öffentlichem Nahverkehr, der Bahn und dem Flugzeug ermöglicht werden könnten, wobei auch Umsteigeeffekte erhoben und analysiert werden könnten.

Diese Arbeit gibt in Kapitel 2 zunächst eine Einführung in die Luftverkehrsthematik und bietet einen Überblick über die Rahmenbedingungen des Flugverkehrs. In Kapitel 3 folgt ein Überblick über die für die Simulation von Verkehr unabdingbaren Bestandteile des Funktionsumfangs von MATSim. Zur automatischen Erzeugung einer Flugbewegungs- und Flughafendatenbank werden in Kapitel 4 Datenquellen analysiert und bewertet. Mit den am besten geeigneten Daten wird die Generierung dieser Datenbanken – als Basis für eine Simulation – verwirklicht. Die zu diesem Zweck getroffenen Annahmen zur Komplexitätsreduzierung werden in Kapitel 5 erläutert. Unter Einsatz des MATSim *Public Transport* Moduls wird die Simulation schließlich in die Praxis umgesetzt. Die in Kapitel 6 dargelegten Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Einbeziehung des Luftverkehrs in MATSim-Simulationen – mit den in Kapitel 7 diskutierten Einschränkungen – vorgenommen werden kann.

Kapitel 2

Einführung in die Luftverkehrsthematik

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die Luftverkehrsthematik. Hierzu werden insbesondere Begriffe erläutert, Rahmenbedingungen dargelegt und Charakteristika des Luftverkehrs aufgezeigt.

2.1 Definitionen und Grundbegriffe

Luftverkehr „Der Begriff Luftverkehr beschreibt die Gesamtheit aller Vorgänge, die der Ortsveränderung von Personen, Fracht und Post auf dem Luftweg dienen und schließt alle mit der Ortsveränderung unmittelbar und mittelbar verbundenen Dienstleistungen (z.B. Flughäfen, Catering) mit ein.“ [69, S. 3]

Flug Ein Flug ist eine Ortsveränderung auf dem Luftweg mit einem Luftfahrzeug. Ein Flug umfasst Start, Streckenflug und Landung.

Flugbewegung Eine Flugbewegung ist jeder Start und jede Landung eines Luftfahrzeuges. Ein Flug von Berlin nach Zürich zum Beispiel erzeugt folglich zwei Flugbewegungen. Der Streckenflug wird im Rahmen dieser Arbeit nicht als Flugbewegung mitgezählt.

Flugplan Es gibt zwei verschiedene Arten von Flugplänen. Einerseits gibt es den Flugplan, der vor jedem Flug vom Flugzeugbetreiber an die Flugsicherung übermittelt werden muss und flugsicherungsrelevante Daten zum Flugverlauf wie Abflug- und Ankunftsroute, Route im ATS-Routennetz, geplante Flughöhe und Notfalleusrüstung des Flugzeugs enthält. Dieser wird im Englischen mit *Flight Plan* bezeichnet [56, S. 86ff]. Andererseits wird die Aufstellung sämtlicher Flüge als Flugplan bezeichnet, analog dem Kursbuch im Eisenbahnverkehr. Letzterer wird im Englischen mit *Schedule* oder *Timetable* bezeichnet. Um eine eindeutige Un-

terscheidung zu ermöglichen werden in dieser Arbeit die flugsicherungsrelevanten Flugpläne als ATC-Flugpläne bezeichnet.

2.2 Charakteristika des Luftverkehrs

Der kommerziellen Luftfahrt werden als Teil der Verkehrswirtschaft Besonderheiten zugeschrieben, die sich wesentlich von anderen Wirtschaftssektoren, wie zum Beispiel der Fertigungswirtschaft, unterscheiden. Dieser Abschnitt bietet einen groben Überblick über die Produkteigenschaften der Flugreise und zwei der zentralen Funktionen des Luftverkehrs: den Beitrag zur Bruttowertschöpfung und die Sicherstellung von freier Mobilität. Weiterhin wird ein Vergleich zu anderen Verkehrsträgern gezogen und auf ökologische Belange eingegangen.

2.2.1 Eigenschaften des Produkts und der Nachfrage

Das Produkt der kommerziellen Luftfahrt, die Flugreise, ist eine nicht stoffliche Dienstleistung. Passagiere können das Produkt vor dem Kauf nicht ausprobieren und es besteht keine Umtauschmöglichkeit bei eventuellen Produktmängeln. Aus der Abstraktheit des Produkts resultiert für den Passagier, dass bei Kauf der Flugreise lediglich ein Dienstleistungsversprechen erworben wird. Folglich muss die Fluggesellschaft in der Lage sein Passagiere zu überzeugen, dass die verkaufte Dienstleistung auch tatsächliche in der beworbenen Form und Qualität erbracht wird. Im Gegensatz zu materiellen Gütern besteht bei Flugreisen in der Regel eine Vorauszahlungspflicht, weil die Fluggesellschaft keinerlei dingliche Sicherheit am Produkt hat, sollte der Kunde die Zahlung des Kaufpreises verweigern. Erstellung und Konsum der Flugreise fallen zeitlich und räumlich zusammen, daher ist eine Speicherung nicht verkaufter Leistungen nicht möglich. Ein nicht verkaufter Sitzplatz stellt folglich eine verlorene Produktionseinheit dar, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr nutzbar ist. Der wichtigste Indikator für die Wirtschaftlichkeit ist somit der kostendeckende Sitzladefaktor, der sogenannte *Break-Even Load Factor* [69, S. 312f]. Die Beförderung vom Startpunkt zum Zielpunkt stellt die Grundleistung des Produkts dar. Eine Differenzierung des Produkts gegenüber Mitbewerbern ist in der Regel nur über Serviceleistungen und den Flugplan möglich, da die in der heutigen Zeit eingesetzten Flugzeugtypen über weitgehend identische Eigenschaften verfügen [63, S. 43ff].

Die Luftverkehrsnachfrage determiniert sich hauptsächlich durch folgende Faktoren [69, S. 106f]:

- Preis und Qualität der Flugreise – Der Preis ist die entscheidende Determinante der Nachfrage. Die Reisezeit ist besonders bei Geschäftsreisen ein wichtiger

Faktor, während sie im Bereich von Privatreisen eine eher untergeordnete Rolle spielt.

- Preise und sonstige Merkmale von Substitutions- und Komplementärgütern – Preisveränderungen und Änderungen von qualitativen Merkmalen von Verkehrsträgern, die mit dem Luftverkehr in Konkurrenz stehen, können den *Modal Split* beeinflussen. Komplementärgüter sind auch Hotelaufenthalte in der Zielregion, deren Preis ebenfalls einen Einfluss auf die Luftverkehrsnachfrage haben kann.
- Verfügbares Einkommen der Haushalte – Es besteht eine Abhängigkeit der privat motivierten Luftverkehrsnachfrage zum Einkommen der Haushalte, die sich unter Verwendung der Einkommenselastizität der Nachfrage beschreiben lässt, welche angibt wie stark der Anstieg der Nachfrage nach einer einprozentigen Einkommenserhöhung ausfällt. Der Zusammenhang zwischen Einkommen und Nachfrage ist nicht von linearer Natur, sondern konvergiert mit steigendem Einkommen.
- Gesamtwirtschaftliche Entwicklung und internationale Handelsverflechtungen – Die Nachfrage nach geschäftlich motivierten Reisen steht in engem Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Situation und dem Wirtschaftswachstum, wobei auch die regionale Verteilung der Reisesströme mit der Entwicklung von internationalen Handelsverflechtungen verbunden ist.
- Geographische Faktoren – Gegenüber anderen Verkehrsträgern kann der Luftverkehr seine Vorteile insbesondere auf langen Distanzen und auf kurzen Distanzen ausspielen, auf denen der Einsatz anderer Verkehrsträger, beispielsweise durch die Insellage des Start- oder Zielpunkts, nur unter erschwerten Bedingungen möglich ist.
- Demographische Aspekte – Es besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Nachfrage und Einwohnerzahl im Start- und Zielgebiet (Ausnahme: touristische Destinationen). Bei älteren Menschen und Familien mit vielen Kindern ist eine geringere Nachfrage zu beobachten. Reisesströme ausländischer Arbeitnehmer oder deren Angehörigen sind ebenfalls ein relevanter Aspekt.
- Trends im Urlaubsverhalten – Großveranstaltungen, wie zum Beispiel Olympische Spiele oder Weltmeisterschaften, und bestimmte Trends in Bezug auf bevorzugte Zielgebiete bilden einen weiteren Faktor.
- Individuelle Einstellung zu Flugreisen – Unter anderem beeinflussen Flugangst und ökologische Motivationen die Nachfrage.

Die Verkehrswertigkeit des Luftverkehrs ergibt sich aus den Qualitätsmerkmalen Massenleistungsfähigkeit, Schnelligkeit, Fähigkeit zur Netzbildung, Berechenbarkeit,

Häufigkeit der Verkehrsbedienung, Sicherheit und Bequemlichkeit [70, S. 71ff]. Insbesondere Schnelligkeit und internationale Netzbildungsfähigkeit kennzeichnen die hohe Verkehrswertigkeit des Luftverkehrs [63, S. 45].

Der reine Gütertransport spielt im europäischen Luftverkehr eine sekundäre Rolle. Die dominante Transportform ist die Beförderung von Fracht als Unterdeck-Ladung in Passagiermaschinen, nur wenige Fluggesellschaften haben sich auf reine Frachtbeförderung spezialisiert. Die Erlöse aus der Frachtbeförderung erreichen nur selten mehr als 25% der Erlöse aus dem Passagiergeschäft [1, S. 20]. Im innerdeutschen und innereuropäischen Frachttransport wird ein Anteil von bis zu 37% der als Luftfracht deklarierten Fracht auf dem Landweg zum Ziel befördert, da teilweise auf der Straße wesentlich kürzere Transportzeiten erreicht werden können. Dennoch hat die Fracht den Luftfrachtstatus, da der Transport auf der Straße, das sogenannte *Trucking* von Luftfracht, einen Luftfrachtersatzverkehr darstellt. Der Luftfrachtersatzverkehr bietet einen erheblichen Kostenvorteil [1, S. 556f].

Für detaillierte, tiefer gehende Erläuterungen zum Produkt Luftverkehr, der Marktcharakteristika und der Eigenschaften der Nachfrage wird auf weiterführende Literatur der angeführten Autoren MENSEN, POMPL und STERZENBACH verwiesen.

2.2.2 Funktionen des Luftverkehrs

Der Luftverkehr leistet einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Bruttowertschöpfung (Wert der erbrachten Güter abzüglich benötigter Vorleistungen). Im Jahr 2004 betrug der Gesamtbeitrag mit US\$ 2,96 Bio. nahezu 8% des Weltinlandsprodukts [63, S. 55]. Der Beitrag wird über direkte (Luftverkehr, Luftfahrtindustrie), als indirekte (u.a. Aufträge an Lieferanten), induzierte (u.a. Konsumnachfrage aus Erwerbseinkommen von Beschäftigten im Luftverkehrssektor) und katalytische Effekte (Attraktivität von Luftverkehrsknotenpunkten für Unternehmen) geleistet. Weltweit belief sich die Zahl der durch diese Effekte generierten Arbeitsplätze im Jahr 2004 auf 29 Millionen. Der Import und Export von Gütern, die mit anderen Verkehrsträgern nicht oder nur mit erheblichem Mehraufwand befördert werden könnten, wird durch den Luftverkehr gefördert. Auch der Außenhandel wird durch zeit- und kostengünstiges Reisen verstärkt.

Zu den gesellschaftlichen Funktionen des Luftverkehrs zählt vor allem die Sicherstellung der freien Mobilität der Bürger. Die Möglichkeit der freien Wahl des Verkehrsmittels mit unbeschränktem Zugang stellt neben dem Vorhandensein eines ausreichenden Verkehrsangebots die Kernpunkte dieser Funktion dar. Das Luftverkehrsangebot wird von der Politik gefördert mit dem Ziel einer größtmöglichen Mobilität, sodass jedes Individuum die freie Auswahl hat, wann es sich mit welchem Verkehrsmittel wohin

	Bahn	ÖStPV	LV	ÖV	ÖPNV in ÖV	MIV
Verkehrsaufkommen	3,5%	13,8%	0,2%	17,5%	17,1%	82,5%
Verkehrsleistung	7,6%	7,3%	5,6%	20,4%	9,3%	79,6%

Tabelle 2.1: Anteile der einzelnen Verkehrsträger am Verkehrsaufkommen und der Verkehrsleistung in Deutschland im Jahr 2008 [11, Eigene Darstellung, vgl. S. 218f und S. 222f]

bewegt. Früher ein Luxusgut für finanziell Privilegierte ist die Flugreise heute eine massenfähige Transportform, deren Anteil an Urlaubsreisen von vier oder mehr Tagen sich im Jahr 2005 auf 36,8% belief [63, S. 53ff].

2.2.3 Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern

Das Transportmittel Flugzeug steht besonders auf kurzen Strecken in intermodalem Wettbewerb zu den Verkehrsträgern MIV, Bus, Bahn und Schiff. Die entscheidenden Kriterien für die Wahl eines Verkehrsträgers sind die Gesamtreisezeit, die Bedienungshäufigkeit und die Reisekosten. Auf kurzen Strecken wird der Geschwindigkeitsvorteil des Flugzeugs durch Bodenprozesse (Einchecken, Sicherheitskontrolle, Einsteigevorgang, Gepäckausgabe) sowie Zu- und Abgangszeiten teilweise komplett zunichte gemacht, weshalb sich auf Kurzstrecken nicht zwingend ein Vorteil bei der Reisezeit ergibt. Als obere Grenze für die Konkurrenzfähigkeit der bodengebundenen Verkehrsträger wird in der Literatur eine Entfernung von 800 - 1.000 Kilometer angeführt. Die größere Bedienungshäufigkeit der Bahn im Entfernungsbereich von 200 - 800 Kilometern stellt einen Wettbewerbsvorteil dar, der auch für den MIV gilt. Die relativ geringe Flächenerschließung des Luftverkehrs, insbesondere im Vergleich zum MIV, bietet nur bedingt Substitutionsmöglichkeiten zugunsten des Luftverkehrs [63, S. 215f]. Mit zunehmender Reisedistanz verschiebt sich der *Modal Split* in Richtung des Luftverkehrs, der ab einer Reisedistanz von etwa 1.000 Kilometern einen Marktanteil von nahezu 100% erreicht [69, vgl. Abbildung 6.4, S. 118]. Tabelle 2.1 stellt die Anteile des Verkehrsaufkommens und die Verkehrsleistung der einzelnen Verkehrsträger im Jahr 2008 in Deutschland dar.

Die Steuerfreiheit von im gewerblichen Luftverkehr eingesetztem Kerosin sowie die Befreiung des internationalen Verkehrs von der Umsatzsteuer stellen aus Sicht der Betreiber von bodengebundenen Verkehrsunternehmen eine Wettbewerbsverzerrung dar. Die Einführung von Steuern auf Kerosin ist EU-rechtlich möglich, würde aber im Falle einer nicht EU-weiten Einführung einen Wettbewerbsnachteil darstellen, da ein Großteil des Verkehrsaufkommens durch Umsteigeverbindungen generiert wird. Luftverkehrsgesellschaften führen an, dass der Luftverkehr seine infrastrukturellen Kosten nahezu komplett selbst finanziere und der bodengebundene Verkehr auch die staatlichen Leistungen zum Erhalt der Infrastruktur am Boden berücksichtigen müsse, was wiederum

eine Befreiung von der Kerosinsteuer rechtfertige. Innerdeutsche Flüge sind im Gegensatz zu internationalen Flügen nicht von der Umsatzsteuer befreit, während zum Beispiel im Schienenverkehr die Umsatzsteuersätze der durchfahrenen Länder entsprechend dem Streckenanteil berechnet werden, was eine Begünstigung des Luftverkehrs darstellt [69, S. 86f].

2.2.4 Umweltbelastungen durch den Luftverkehr

Der Luftverkehr verursacht vielfältige Belastungen der Umwelt und verbraucht nicht regenerierbare Energien. Dies geschieht einerseits direkt im Flugbetrieb, andererseits durch die Bereitstellung von Infrastruktur und durch induzierte Umweltbelastungen. Zu letzteren zählen unter anderem der induzierte bodengebundene Verkehr, der von Passagieren und Angestellten der Luftfahrtindustrie genutzt wird um zum Flughafen zu gelangen. Der Landschaftsverbrauch der Luftverkehrsinfrastruktur ist mit etwa 1% des gesamten durch Verkehr bewirkten Landschaftsverbrauchs sehr gering (Bahn 4%, Straße 83%) [40, S. 3]. Durch den Flugverkehr entstehen eine Vielzahl von Emissionen:

- Lärm – Triebwerkslärm und aerodynamischer Lärm
- Kohlenmonoxid – 0,7 - 2,5 g pro kg Kerosin
- Kohlendioxid – 3,15 kg pro kg Kerosin
- Wasser – 1,24 kg pro kg Kerosin
- Stickoxide – 6 - 16 g pro kg Kerosin
- Schwefeldioxid – 1 g pro kg Kerosin
- Staub – 0,01 - 0,03 g pro kg Kerosin
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe – 0,1 - 0,7 g pro kg Kerosin

Die durch den Luftverkehr entstehenden Immissionen können Lebewesen, Gebäuden und unbelebter Natur Schaden zufügen. Die aufgezählten Stoffe haben teilweise eine direkte, schädliche Wirkung in Bodennähe: Kohlenmonoxid begünstigt beispielsweise gesundheitliche Schäden durch Sauerstoffmangel in Form von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schwefeldioxid verursacht durch Umwandlung in schweflige Säure sauren Regen [63, S. 68ff]. Des Weiteren trägt der Luftverkehr maßgeblich zur anthropogenen Erderwärmung bei. Der Anteil der Kohlendioxid-Emissionen des weltweiten Luftverkehrs liegt bei etwa 2% (Anteil weiterer Verkehrsträger: 13%), die Wirkung dieser Emissionen verstärkt sich noch durch die Höhenwirkung in der Stratosphäre (oberhalb von 8 - 15 Kilometern). Der Emission von Wasser in der Stratosphäre wird ebenfalls eine nicht vernachlässigbare Wirkung auf den künstlich herbeigeführten Treibhauseffekt

zugeschrieben [69, S. 70ff].

Forderungen nach einer Besteuerung von Kerosin zur Reduzierung der Emissionen durch einen daraus resultierenden Nachfragerückgang, besonders im touristischen Bereich, sind seit dem Beschluss, den Luftverkehr am Emissionshandel zu beteiligen in den Hintergrund gerückt [69, S. 87]. Seit dem 1. Januar 2010 müssen die Emissionen aller Flüge, die in der EU, Norwegen, Liechtenstein und Island starten oder enden, erfasst und berichtet werden. Ziel des Emissionshandels ist die Reduzierung der Kohlendioxid-Emissionen um 3% in 2012 und um jeweils 5% ab 2013 [14].

2.3 Wichtige Institutionen und Verbände

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den wichtigsten internationalen und nationalen Institutionen, Verbänden und Organisationen und dient dazu einen Überblick über die Rahmenbedingungen des Luftverkehrs zu gewinnen.

2.3.1 ICAO

Die Gründung der *International Civil Aviation Organization* wurde 1944 im Rahmen der Chicagoer Konferenz über die internationale Zivilluftfahrt eingeleitet und konnte 1947 mit der Ratifizierung des Chicagoer Abkommens (*Convention on International Civil Aviation*) abgeschlossen werden [69, S. 24]. Die ICAO stellt eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen dar, der zurzeit 190 Staaten angehören. Die Bundesrepublik Deutschland ist seit 1956 Mitglied der ICAO [43].

Im Artikel 44 des Chicagoer Abkommens [45, S. 20f] sind die Ziele und Aufgaben der ICAO wie folgt zusammengefasst:

- Sicherstellung eines sicheren und geordneten Wachstums der internationalen Zivilluftfahrt weltweit
- Förderung des Baus und des Betriebs von Luftfahrzeugen zu zivilen Zwecken
- Förderung der Entwicklung von Luftstraßen, Flugplätzen und Flugsicherungsanlagen für die internationale Zivilluftfahrt
- Vermeidung von wirtschaftlicher Verschwendung als Folge übermäßigen Wettbewerbs
- Sicherung der Rechte aller Vertragsstaaten und deren Betrieb internationaler Fluggesellschaften
- Vermeidung von Diskriminierung zwischen Mitgliedsstaaten
- Voranbringung der Flugsicherheit im internationalen Luftverkehr

- Generelle Förderung der Entwicklung aller Aspekte der internationalen Zivilluftfahrt

Zusätzlich zum Chicagoer Abkommen existieren insgesamt 18 Anhänge (*Annex 1-18*), in denen Richtlinien und Empfehlungen (*Standards and Recommended Practices*) zur internationalen Zivilluftfahrt festgehalten werden. Alle drei Jahre treffen sich Vertreter aller Mitgliedsstaaten zur Generalversammlung, dem obersten legislativen Organ der ICAO. Zudem gibt es einen ständigen Rat, dem 36 Mitglieder angehören und diverse Ausschüsse. Die Ergebnisse der Tätigkeiten werden regelmäßig in den Anhängen veröffentlicht. Dabei hat die Umsetzung von Richtlinien für alle Mitgliedsstaaten einen verbindlichen Charakter, wohingegen die Umsetzung von Empfehlungen nur als wünschenswert angesehen wird [63, S. 20ff]. Die ICAO befasst sich in erster Linie mit der Herausgabe und Überarbeitung technischer Standards für die Luftfahrt, führt jedoch auch Statistiken zu Flugbewegungen, Passagierzahlen, Flotten, Luftfahrtpersonal, finanziellen Kennzahlen der Luftfahrtbranche und Unfällen in der Luftfahrt [57, S. 108f].

2.3.2 IATA

Die *International Air Transport Association* ist der Weltverband der kommerziellen Luftverkehrsunternehmen. Die IATA, mit Hauptbüros in Montreal und Genf, wurde im Jahr 1945 gegründet [69, S. 27]. Im Jahr 2010 waren über 230 Fluggesellschaften aus mehr als 115 Ländern Mitglied der IATA. Nach eigenen Angaben führen alle Fluggesellschaften, die der IATA angehören, rund 93% des weltweiten Linienverkehrs aus [38]. Das oberste Führungsorgan, die Generalversammlung, tritt einmal jährlich zusammen. Des Weiteren gibt es fünf ständige Hauptabteilungen, die vor allem der Unterstützung der Mitglieder in technischen, operativen, politischen und finanziellen Fragen dienen:

- *Corporate Services*
- *Industry Distribution and Financial Services*
- *Marketing and Commercial Services*
- *Member and Government Relations & Corporate Secretary*
- *Safety, Operations and Infrastructure*

Die Hauptziele der IATA sind, ähnlich der Ziele der ICAO, die Sicherstellung von geordnetem Wachstum des Luftverkehrs und die Bereitstellung der Mittel für eine Zusammenarbeit von Luftverkehrsunternehmen [63, S. 24f].

Der größte von der IATA durchgeführte Ereignis ist die IATA Flugplankonferenz (*IATA Schedules Conference*), die zweimal jährlich stattfindet. Diese freiwillige Versammlung von Mitgliedern und Nicht-Mitgliedern stellt unter anderem ein Forum für die Zuweisung von Slots an sogenannten koordinierten Flughäfen dar, die an ihrer Kapazitätsgrenze operieren. In der IATA Flugplankonferenz wird außerdem festgelegt welche Flughäfen koordiniert werden. Während der Flugplankonferenz werden die verfügbaren Slots der koordinierten Flughäfen an die Fluggesellschaften verteilt, was meist in bilateralen Verhandlungen zwischen Fluggesellschaften und Flughafenkoordinatoren geschieht. Auch haben Fluggesellschaften die Möglichkeit untereinander Slots zu tauschen oder anderweitig zu handeln. Die Flugplankonferenz ermöglicht zum Beispiel Fluggesellschaften einen Einstieg in koordinierte Flughäfen, auf denen sie bisher nicht vertreten sind [39].

2.3.3 Europäische Luftverkehrsverwaltung

EUROCONTROL und die CFMU

EUROCONTROL ist die Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt. Sie wurde 1960 von der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Großbritannien Luxemburg und den Niederlanden gegründet [28, S. 1f] und ist eine zwischenstaatliche Organisation mit 38 Mitgliedern (Stand 2010) [24]. EUROCONTROL wurde ursprünglich gegründet, um eine gemeinsame Durchführung von ATC-Diensten im oberen Luftraum zu ermöglichen. Bis heute haben sich die Ziele und Aufgaben der EUROCONTROL jedoch vervielfacht. Das Hauptziel der EUROCONTROL ist heute die Schaffung eines einzelnen, zusammenhängenden Luftraums, dem „Single European Sky“. Bisher unterliegt der Luftraum über den Mitgliedsstaaten fast ausschließlich den nationalen Flugsicherungen, was in 38 nationalen Lufträumen resultiert. Um den Luftverkehr besser koordinieren zu können, wurde 1995 die CFMU geschaffen und seit 1991 die verschiedenen Computersysteme der nationalen Flugsicherungsstellen untereinander kompatibel gemacht. Die Aufgabe der CFMU ist die Sicherstellung eines geordneten Verkehrsflusses in Europa. In Zukunft sollen auch die Kontroll- und Navigationssysteme harmonisiert werden um schlussendlich einen einheitlichen Luftraum über Europa zu schaffen [63, S. 23].

European Aviation Safety Agency (EASA)

Die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) mit Sitz in Köln wurde 2002 durch Umsetzung der Verordnung (EG) Nr. 1592/2002 gegründet, welche in der Zwischenzeit durch die Verordnung (EG) Nr. 216/2008 abgelöst worden ist [33]. Das Hauptziel der EASA ist „die Förderung der höchstmöglichen gemeinsamen Sicherheits- und Umweltstandards in der Zivilluftfahrt“ [32]. Der Aufgabenbereich der EASA besteht derzeit

aus Folgendem:

- fachliche Beratung der EU bei der Erarbeitung neuer Rechtsvorschriften
- Umsetzung und Überwachung von Sicherheitsvorschriften, z. B. durch Kontrollen in den Mitgliedsstaaten
- Musterzulassung luftfahrttechnischer Produkte (Flugzeuge, Triebwerke, Ausrüstungsteile) sowie Genehmigung von Unternehmen, die im Bereich der Entwicklung, Herstellung und Wartung von Luftfahrtprodukten tätig sind
- Sicherheitsgenehmigung für außereuropäische Airlines
- Datenerhebung, Analyse und Forschung zur Verbesserung der Flugsicherheit

Langfristig ist auch die Vorschriftenerstellung von Sicherheitsstandards für Flughäfen sowie für Flugverkehrsmanagementsysteme geplant. Als eigenständige Rechtspersönlichkeit ist die EASA von der EU-Kommission unabhängig. Stellungnahmen und Empfehlungen zur Erarbeitung von Rechtsvorschriften werden von der EASA an die EU-Kommission weitergeleitet und von letzterer in Verordnung umgesetzt, die über der nationalen Gesetzgebung stehen [31]. Um die Rechtsvorschriften auf nationaler Ebene durchzusetzen beleiht die EASA die nationalen Behörden (in Deutschland: LBA), die bestimmte Aufgaben für die EASA ausführen und die Einhaltung der EU-Gesetzgebung überwachen [50].

2.3.4 Nationale Luftverkehrsverwaltung

Nach [6, Art 87d (1) GG] unterliegt die Luftverkehrsverwaltung dem Bund. Das für den Luftverkehr zuständige Bundesministerium ist das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Es gibt vier Bundesbehörden, die für den Luftverkehr eine besondere Relevanz haben [10].

Luftfahrt-Bundesamt (LBA)

Das LBA erfüllt Zulassungs-, Genehmigungs- und Aufsichtsfunktionen. Es ist unter anderem zuständig für die Prüfung der Lufttüchtigkeit, die Genehmigung von deutschen Luftfahrtunternehmen und die Zulassung von Luftfahrtpersonal [50].

Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU)

Die BFU ist mit der Untersuchung und Ermittlung der Ursachen von Unfällen und schweren Störungen beim Betrieb von Luftfahrzeugen in Deutschland betraut [12].

Deutsche Flugsicherung (DFS)

Die DFS übernimmt in Deutschland die Aufgaben der Flugverkehrskontrolle und nimmt im Rahmen dieser Tätigkeit ATC-Flugpläne entgegen und erteilt Start-, Strecken- und Landefreigaben. Weitere Aufgaben der DFS sind unter anderem die Ausbildung von Fluglotsen, die Entwicklung und Verbesserung von An- und Abflugrouten und -verfahren sowie die Mitarbeit bei der EUROCONTROL zur Schaffung des *Single European Sky* [18].

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Die Aufgaben des DWD umfassen sowohl die meteorologische Sicherstellung der Luftfahrt als auch die kurz- und langfristige Erfassung, Überwachung und Bewertung der meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre [16].

Bestimmte Aufgabenbereiche können laut [6, Art 87d (2) GG] an die Länder übertragen werden. Auf Landesebene stellen Senate und Ministerien die obersten Luftfahrtbehörden dar, während Regierungspräsidien, Bezirksregierungen und Luftämter Mittelbehörden darstellen. Die Aufgaben der Länder sind in [9, §31 (2) LuftVG] festgelegt.

2.4 Flugplatzkategorien

Dieses Kapitel setzt sich mit verschiedenen Flugplatzkategorien auseinander. Die Eigenschaften der einzelnen Flugplatzkategorien werden kurz beschrieben und Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufgezeigt.

2.4.1 Flugplätze

Ein Flugplatz ist nach Definition der ICAO ein festgelegtes Gebiet auf dem Land oder Wasser (einschließlich aller Gebäude, technischer Ausrüstung und Betriebsanlagen), das komplett oder teilweise für Abflug, Ankunft und Bodenbewegungen von Luftfahrzeugen bestimmt ist [46, *Chapter 1*, S. 2].

In der deutschen Gesetzgebung werden Flughäfen, Landeplätze und Segelfluggelände unter dem Begriff Flugplatz zusammengefasst [9, §6 (1) LuftVG].

2.4.2 Flughäfen

Flughäfen sind Flugplätze, für die nach Art und Umfang des Verkehrs ein Bauschutzbereich gemäß [9, §12 LuftVG] obligatorisch ist. Innerhalb des Bauschutzbereiches gelten Baubeschränkungen, nach denen Gebäude bestimmte Höhen nicht überschreiten dürfen, ohne von den Luftfahrtbehörden genehmigt worden zu sein [57, S. 212ff].

Es wird zwischen Verkehrsflughäfen und Sonderflughäfen unterschieden. Erstere stehen

dem allgemeinen Verkehr offen und es besteht eine Betriebspflicht [57, S. 87].

In Deutschland gibt es 23 internationale Verkehrsflughäfen: Berlin-Tegel, Berlin-Schönefeld, Bremen, Dortmund, Dresden, Düsseldorf, Erfurt, Frankfurt am Main, Friedrichshafen, Hahn, Hamburg, Hannover, Karlsruhe/Baden-Baden, Köln/Bonn, Leipzig/Halle, Lübeck, München, Münster/Osnabrück, Nürnberg, Paderborn/Lippstadt, Saarbrücken, Stuttgart und Weeze [3, S. 2].

Einen Sonderflughafen gibt es zum Beispiel in Oberpfaffenhofen. Dieser wird vor allem von dort ansässigen Luftfahrtunternehmen und dem Deutschen Institut für Luft- und Raumfahrt genutzt. Eine Landung ist nur nach vorheriger Zustimmung des Flughafenunternehmens möglich [23].

2.4.3 Landeplätze

Landeplätze sind Flugplätze, die nicht nur als Segelfluggelände dienen. Für Landeplätze ist die Einrichtung eines Bauschutzbereiches nach [9, §12 LuftVG] nicht notwendig. Es wird zwischen Verkehrslandeplätzen und Sonderlandeplätzen unterschieden [8, §49 LuftVZO].

Verkehrslandeplätze stehen dem allgemeinen Verkehr zu festgelegten Betriebszeiten offen und es existiert eine Betriebspflicht [69, S. 160f].

Für Sonderlandeplätze besteht keine Betriebspflicht und diese stehen auch nicht der Allgemeinheit offen. Sonderlandeplätze können zum Beispiel von Flugzeugherstellern für Testflüge und Auslieferungen von Flugzeugen genutzt werden. So betreibt der Flugzeughersteller Airbus an seinem Werk in Hamburg-Finkenwerder einen Sonderlandeplatz [69, S. 161].

2.4.4 Segelfluggelände

Segelfluggelände sind Flugplätze, die für die Nutzung durch Segelflugzeuge und nicht selbststartende Motorsegler bestimmt sind. Auf Antrag kann die Betriebsgenehmigung auch auf selbststartende Motorsegler, Freiballone, Luftsportgeräte und Luftfahrzeuge erweitert werden [8, §54 LuftVZO].

2.5 Luftraum- und Luftstraßenstruktur

Beim Luftraum handelt es sich um eine komplexe, dreidimensionale Struktur. Die Grenzen des deutschen Luftraums sind, abgesehen von einigen Gebieten über der Nord- und Ostsee, nahezu identisch mit den Grenzen des Bundesgebiets [56, S. 118]. Eine Basis der Struktur bilden die Luftraumklassen. Nach [7, Anlage 4 zu §10 (2) LuftVO] existieren sieben Luftraumklassen. Diese Regelung entspricht der Klassifizierung nach ICAO Richtlinien [56, S. 137]. Die sieben Klassen sind von A bis G nummeriert. Weiterhin existieren Gefahrengebiete (ED-D) und Flugbeschränkungsgebiete (ED-R), die nicht

durchflogen werden dürfen. Die Klassen A-E stellen den kontrollierten Luftraum dar, in dem für alle Teilnehmer (außer Flüge nach Sichtflugregeln in Klasse E) eine Flugverkehrs-kontrollfreigabe erforderlich ist. Für Flüge im unkontrollierten Luftraum ist diese nach Sichtflugregeln nicht erforderlich. Für Instrumentenflugregeln ist eine Flugverkehrs-kontrollfreigabe in Klasse F erforderlich, in Klasse G ist der Instrumentenflug nicht zulässig. Auf Flugregeln wird in den Abschnitten 2.6.1 und 2.6.2 detailliert eingegangen. Eine Übersicht der Luftraumklassen in Deutschland bietet Abbildung 2.1.

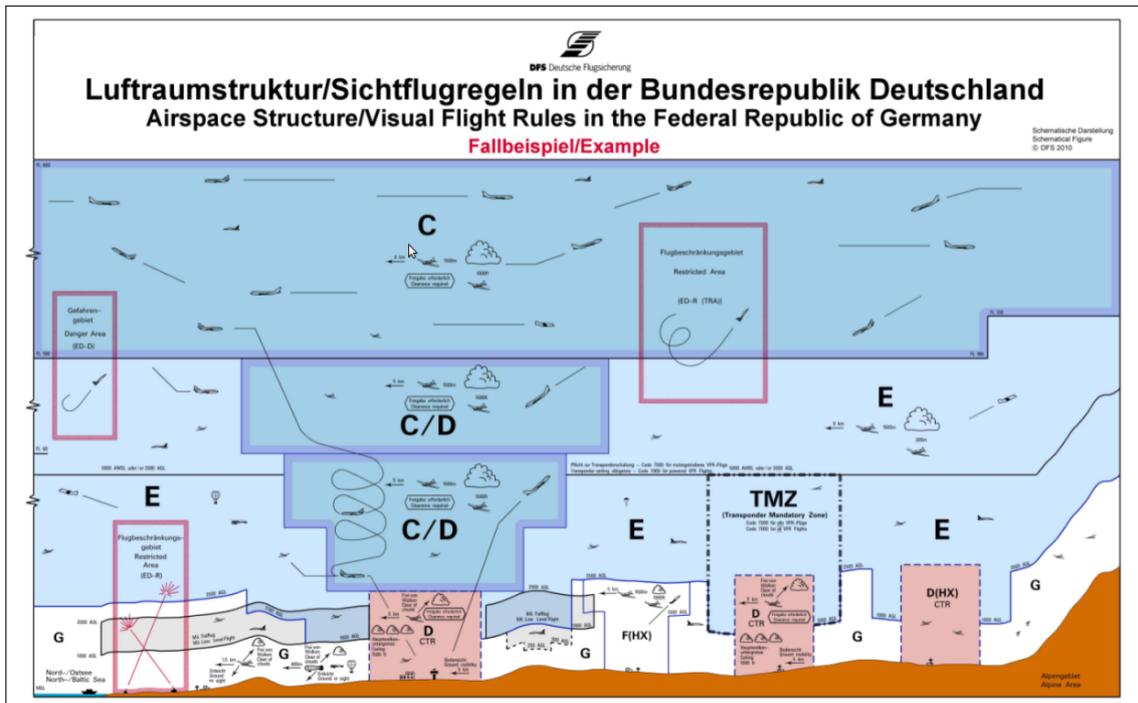


Abbildung 2.1: Luftraumstruktur der Bundesrepublik Deutschland [19]

Zusätzlich zu dieser Unterscheidung wird vertikal zwischen dem unteren und dem oberen Luftraum unterschieden. Der untere Luftraum erstreckt sich dabei von der Erdoberfläche bis zu Flugfläche 245, der obere Luftraum von Flugfläche 245 an ohne Obergrenze. Die Obergrenze des kontrollierten Luftraums liegt in Flugfläche 460. Das Flugflächensystem dient der Höhenseparation zwischen Luftfahrzeugen. Hierzu muss im Luftfahrzeug die Höhenmessereinstellung auf 1013,25 hPa gesetzt werden, was dem Druck der Normatmosphäre auf Meereshöhe entspricht. Eine zuverlässige Höhenmessung ist mit dieser Einstellung zwar nicht möglich, aber die eindeutige Zuordnung einer Druckfläche wird gewährleistet [56, S. 120f].

In den Luftraumklassen C bis E erfolgt eine Staffelung des Flugverkehrs durch die Flugverkehrskontrolle, um Kollisionen zu vermeiden. Es kann sowohl eine Längsstaffelung, als auch eine vertikale Staffelung durchgeführt werden. Die vertikale Staffelung bedient

sich des Flugflächensystems, die Längsstaffelung erfolgt entweder nach einem Zeitkriterium oder einem Entfernungskriterium [56, S. 162ff].

[7, §10 (1) LuftVO] sieht die Einteilung des deutschen Luftraums in Fluginformationsgebiete vor. Der untere Luftraum besteht aus drei Fluginformationsgebieten (*Flight Information Regions* (FIR)): Bremen, Langen und München. Für den oberen Luftraum bestehen zwei Fluginformationsgebiete (*Upper Flight Information Regions* (UIR)): Karlsruhe und Maastricht (Flugverkehrskontrolle durch EUROCONTROL). Eine weitere Unterteilung des Luftraums innerhalb der Fluginformationsgebiete findet in Kontrollbezirke statt, welche wiederum in Radarsektoren aufgeteilt sind.

Ähnlich dem Straßenverkehrsnetz gibt es in der Luft ein Luftstraßennetz, das sich im unteren und oberen Luftraum unterscheidet. Die Festlegung des ATS-Routennetzes richtet sich nach Funknavigationsanlagen, wobei die Verkehrswege als Großkreissegmente zwischen solchen definiert werden. Durch Aneinanderreihung mehrerer Großkreissegmente ergeben sich die Routenführungen sogenannte *ATS-Routes*. Ergänzend zu diesen *ATS-Routes* sind Streckenführungen festgelegt, die von den *ATS-Routes* von und zu Flughäfen führen. Diese werden im Fall von Anflügen als *Standard Arrival Routes* (STAR) und im Fall von Abflügen als *Standard Instrument Departure Routes* (SID) bezeichnet. Hierzu finden in neuerer Zeit des Öfteren GPS-gestützte Verfahren Anwendung [56, S. 120ff].

Im April 1998 wurde europaweit die sogenannte Flächennavigation (*Area Navigation* – RNAV) eingeführt. RNAV ermöglicht die Kombination von mehreren Navigationssystemen, unter anderem von GPS mit konventionellen Funknavigationsanlagen oder auch nur GPS. Zur Nutzung von RNAV wurden mittels geografischen Koordinaten Wegpunkte *Waypoints* festgelegt, die von konventionellen Funknavigationsanlagen unabhängig sind. Diese Wegpunkte ermöglichen die Navigation abseits des ATS-Routennetzes und ein Abfliegen von beliebigen Wegpunkten. Dadurch erhöht sich die Flexibilität der Routen und gleichzeitig die Kapazität des Luftverkehrsnetzes. RNAV spielt mittlerweile in Europa eine dominierende Rolle [52, S. 92ff]. In der Praxis wird heutzutage viel über sogenannte *direct-to* Anweisungen gearbeitet. Eine *direct-to* Anweisung wird von der Flugsicherung gegeben oder vom Luftfahrzeugführer angefragt und von der Flugsicherung bestätigt oder abgelehnt. Bei einem *direct-to* wird von der im ATC-Flugplan eingereichten Route abgewichen. In der Regel stellt ein *direct-to* eine Abkürzung dar. Das Ziel eines *direct-to* kann sowohl ein RNAV-Wegpunkt als auch eine bodengestützte Funknavigationsanlage sein.

2.6 Verkehrsarten

Im Folgenden werden verschiedene Arten von Flügen untereinander abgegrenzt. Hierbei wird auf Flugregeln und Charakteristika des unterschiedlichen Flugverkehrs eingegangen.

2.6.1 Flüge nach Sichtflugregeln

Flüge nach Sichtflugregeln (*Visual Flight Rules* (VFR)) in den dafür zugelassenen Luftraumklassen B bis G sind so durchzuführen, dass die jeweiligen vorgeschriebenen Mindestwerte für die Flugsicht und die Abstände von Wolken nicht unterschritten werden. Flugsicht ist hierbei die Sicht aus dem Cockpit in Flugrichtung [7, §28 LuftVO]. Die Aufgabe eines ATC-Flugplans für Flüge nach Sichtflugregeln ist nach deutschem Recht nur unter bestimmten Voraussetzungen erforderlich [56, S. 86f]:

- Durchführung eines Fluges nach Sichtflugregeln bei Nacht, soweit sie über die Umgebung eines Flugplatzes hinausführen
- grenzüberschreitende Flüge nach Sichtflugregeln
- Flüge in Gebieten mit Flugbeschränkungen, soweit dies bei der Festlegung der Gebiete angeordnet ist

Ein Übergang von Sichtflugregeln zu Instrumentenflugregeln während des Flugs ist möglich. Die Flugverkehrskontrolle muss über den Übergang informiert werden.

2.6.2 Flüge nach Instrumentenflugregeln

Für Flüge nach Instrumentenflugregeln (*Instrument Flight Rules* (IFR)) ist die Aufgabe eines ATC-Flugplans obligatorisch. Flüge nach Instrumentenflugregeln unterliegen der Luftverkehrskontrolle. Fallspezifische Regeln für Start und Landung sind An- und Abflugkarten des jeweiligen Flugplatzes zu entnehmen. Analog zum Übergang von Sichtflugregeln zu Instrumentenflugregeln ist dies auch in umgekehrter Richtung möglich. Der Übergang darf jedoch nur erfolgen, wenn die nach Sichtflugregeln vorgeschriebenen Mindestwerte für Flugsicht und Mindestabstände eingehalten werden können.

2.6.3 Linienflugverkehr

Das Chicagoer Abkommen charakterisiert Linienflugverkehr als „*any scheduled air service performed by aircraft for the public transport of passengers, mail or cargo*“ [45, Artikel 96 (a), S. 43]. Linienflugverkehr ist nach deutschem Recht durch Gewerbsmäßigkeit, Öffentlichkeit, Regelmäßigkeit, Linienbindung, Betriebspflicht, Beförderungspflicht und Tarifpflicht gekennzeichnet [63, S. 33f].

Nach [9, §21 (1) LuftVG], die der deutschen Umsetzung der [35, Verordnung (EG) Nr. 1008/2008] entspricht, bedürfen Luftfahrtunternehmen die Personen oder Sachen gewerbsmäßig durch Luftfahrzeuge auf bestimmten Linien öffentlich und regelmäßig befördern (Fluglinienverkehr) einer Flugliniengenehmigung sowie einer Betriebsgenehmigung nach [9, §20 LuftVG]. Luftfahrtunternehmen, die dem Luftverkehrsrecht der Europäischen Gemeinschaft unterliegen, bedürfen ebenfalls einer Genehmigung [35, Artikel 3 Absatz 1, Verordnung (EG) Nr. 1008/2008].

2.6.4 Gelegenheitsverkehr

Der Gelegenheitsverkehr lässt sich in folgende Kategorien einordnen:

- Pauschalreiseverkehr
- Selbstbenutzer-Charterflug
- Bedarfsflugverkehr mit festen Flugzeiten
- Rund-, Taxi- und Reklameflüge
- Nichtgewerblicher Verkehr

Der Pauschalreiseverkehr lässt sich nur noch bedingt als Gelegenheitsverkehr einstufen. In der derzeitigen Erscheinungsform findet eine Annäherung an den Linienluftverkehr statt. Eine regelmäßige und ganzjährige Bedienung der Hauptreisestrecken ist dieser Tage gängige Praxis [63, S. 35]. Des Weiteren werden geringere Teile der Sitzplätze an Reiseveranstalter veräußert und nennenswerte Anteile im Einzelplatzverkauf angeboten. Der Flugplan orientiert sich dennoch stark an dem von Reiseveranstaltern mitgeteilten Bedarf [69, S. 252]. Der oft genutzte Begriff Charterverkehr, der in der Praxis geläufig ist, trifft demzufolge nicht zu [63, S. 35].

Unter die Kategorie Selbstbenutzer-Charter fallen Flüge, bei denen die gesamte Sitzplatzkapazität im Rahmen des Chartervertrags zur Verfügung gestellt wird. Eine Weitergabe an Dritte gegen Entgelt ist nicht zulässig. Zum Selbstbenutzer-Charter zählen unter anderem die *Business Aviation* und die *Personal Aviation* [69, S. 254f].

Der Bedarfsflugverkehr mit festen Flugzeiten ist nach [9, §22 LuftVG] dem Gelegenheitsverkehr zuzuordnen, ist aber von der Abwicklung her mit dem Linienverkehr vergleichbar. Bestimmte Strecken werden nach einem veröffentlichten Flugplan regelmäßig beflogen, sofern tatsächlich Bedarf besteht. Eine Betriebs- oder Beförderungspflicht besteht nicht [63, S. 40]. Ein Beispiel für Bedarfsflugverkehr mit festen Flugzeiten ist der Inselverkehr von Ostfriesland auf die ostfriesischen Inseln.

2.7 Verkehrsstatistiken

Für eine Darstellung der Verkehrsleistung werden mehrere Kennzahlen des Luftverkehrs herangezogen. Zunächst wird die Zahl der Flugbewegungen aufgezeigt, gefolgt von Passagierzahlen, Passagierkilometern, der Sitzplatzauslastung und Wachstumsprognosen, um einen Ausblick auf die Entwicklung der kommenden Jahre zu ermöglichen.

2.7.1 Flugbewegungen

In den 38 Mitgliedsstaaten der EUROCONTROL fanden im Jahr 2009 9,41 Millionen Flugbewegungen statt [29, S. 5]. In Deutschland lag die Zahl der Flugbewegungen in 2009 bei 1,76 Millionen [20].

2.7.2 Passagierzahlen, Passagierkilometer, Auslastung

Nach Angaben der ICAO wurden im Jahr 2009 2,277 Mrd. Passagiere und 37,8 Mio. Tonnen Fracht im weltweiten Linienverkehr befördert. Die geleisteten RPK beliefen sich auf 4,245 Bio., während 140,6 Mrd. Fracht-Tkm erbracht wurden [47, Appendix 1, Table 1]. Aus 5,587 Bio. SKO ergibt sich ein LF von 76% weltweit [47, Appendix 1, Table 3].

In Europa wurden nach ICAO Angaben 637 Mio. Passagiere befördert, 1,191 Bio. RPK und 34,27 Fracht-Tkm geleistet. Es ergibt sich ein LF von 76%. Der Anteil der weltweit geleisteten RPK in Europa betrug 28,1% [47, Appendix 1, Table 4].

Das Statistische Bundesamt Deutschland liefert monatlich im Rahmen der Fachserie 8 Reihe 6 des Publikationsservice eine detaillierte Darstellung von Verkehrskennzahlen für den Luftverkehr innerhalb Deutschlands sowie von und nach Deutschland. Im Jahr 2009 wurden im innerdeutschen Verkehr 58,38 Mrd. Pkm und 1,26 Mrd. Fracht-Tkm geleistet [68, Fachserie 8, Reihe 6, Dezember 2009].

Der innerdeutsche Verkehr wird vom statistischen Bundesamt monatlich veröffentlicht, ohne dass eine Kumulation auf das Kalenderjahr vorgenommen wird. Im September 2009 fanden in Deutschland 26402 Flüge, davon 23017 im Linienverkehr, statt. Die erbrachte Verkehrsleistung liegt bei 840 Millionen Passagierkilometern mit einem Anteil von über 99,9% im Linienverkehr [68, Fachserie 8 Reihe 6, September 2009].

2.7.3 Wachstumsprognosen

Die im Dezember 2010 erschienene Ausgabe der IATA *Financial Forecast* sagt dem Passagierverkehr im Jahr 2010 ein Plus von 8,9% der Passagierzahlen im Vergleich zum Vorjahr voraus, während in 2009 noch eine Verringerung von 2,1% anzutreffen war. Das

von der IATA erwartete Wachstum im Jahr 2011 liegt bei 5,2% [41, S. 4]. Im Gegensatz zur IATA veröffentlichen die beiden größten Flugzeughersteller Airbus und Boeing langfristige Wachstumsprognosen für den Luftverkehr. Sie werden jährlich herausgegeben und umfassen einen Ausblick über die folgenden 20 Jahre. Airbus sieht bis zum Jahr 2029 ein weltweites Wachstum des Passagierverkehrs um 4,8% pro Jahr voraus [2], dahingegen liegt der von Boeing erwartete Wert bei 5,3% [5]. Dies entspricht bei einem Anstieg um den Faktor 2,5 bis 2,8 weit mehr als einer Verdoppelung der Passagierkilometer im Luftverkehr. Für den Passagierverkehr in Europa geht Airbus von einem jährlichen Anstieg von 4,1% aus, während Boeing eine Erhöhung vom 4,4% vorausrechnet. Über die folgenden 20 Jahre ergibt sich eine Erhöhung der Passagierkilometer um den Faktor 2,2 bis 2,4 ebenfalls mehr als eine Verdoppelung.

Kapitel 3

Die agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim

MATSim (*Multi-Agent Transport Simulation*) ist eine vorwiegend an der Technische Universität Berlin und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich in JAVA entwickelte *Open Source* Mikrosimulation, mit der Verkehrs- und Evaluierungsszenarien simuliert werden können. MATSim ermöglicht die Simulation von individuellem und zeitabhängigem Verhalten für jeden Verkehrsteilnehmer (Agent). Die Leistungsfähigkeit von MATSim reicht hierbei aus, um Szenarien mit bis zu 8 Millionen Agenten zu simulieren, die sich auf einem Netz mit mehreren hunderttausend Kanten bewegen können [59, S. 18f]. Der modulare Ansatz von MATSim bietet die Voraussetzungen für eine Erweiterung durch eigene Algorithmen [53].

3.1 Überblick: Funktionalität von MATSim

Abbildung 3.1 zeigt die drei Abschnitte einer MATSim-Simulation. Der erste Abschnitt, die Vorbereitung, umfasst die Erstellung von Eingangsdaten: Netzwerke (**Network**) aus Kanten (**Link**) und Knoten (**Node**), Einrichtungen wie Arbeitsplätze oder Einkaufszentren (**Facility**), eine Bevölkerung (**Population**) und eine daraus resultierende Anfangsnachfrage. Auf der Basis der Eingangsdaten werden für jeden Agenten der Bevölkerung Pläne generiert. Der zweite Abschnitt, die Iteration, umfasst die Simulation im eigentlichen Sinn. Während einer Simulation wird für jeden Agenten ein Plan ausgeführt, welcher im Anschluss bewertet wird. Die Ausführung erfolgt dabei für alle Agenten simultan mit einer gegenseitigen Beeinflussung. Ebenso findet eine Konkurrenz um vorhandene Kapazitäten im Netzwerkstatt. Nach Abschluss eines Durchlaufs bekommt eine bestimmte Anzahl Agenten die Möglichkeit, ihren Plan für den nächsten Simulationsdurchlauf zu ändern, was als *Replanning* bezeichnet wird. Die mehrfache Ausführung von Ausführung, Bewertung und *Replanning* wird Iteration genannt. Durch die Änderung der Pläne wird ein Lerneffekt der Agenten simuliert. Abschnitt drei, die

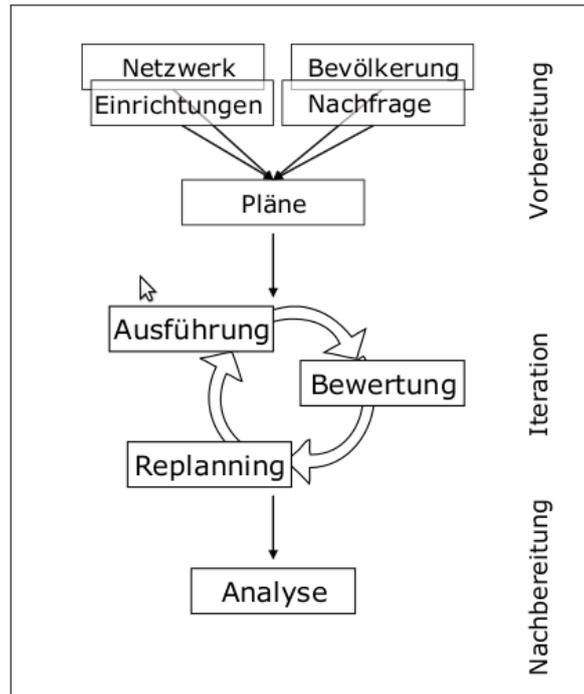


Abbildung 3.1: Die drei Abschnitte Vorbereitung, Iteration und Nachbereitung beschreiben den Ablauf einer MATSim-Simulation. Diese Arbeit befasst sich schwerpunktmäßig mit der Vorbereitung [59, S. 18].

Nachbereitung, befasst sich mit der Analyse der bei den Iterationen erzeugten Daten. Alle Ereignisse (**Event**) der Simulation werden als Ergebnis der Simulation in eine Datei geschrieben, die als Ableitung der Simulation verstanden werden kann [59, S. 18f].

3.2 Das Public Transport Modul in MATSim

Das **Public Transport Modul (PT)** in MATSim ermöglicht die Simulation von öffentlichem Verkehr nach einem definierten Fahrplan. Voraussetzungen um PT nutzen zu können sind [55]:

- ein **Network** mit **Links**, die für PT nutzbar sind
- eine **xml**-Datei mit Beschreibung der verfügbaren **Vehicles**
- eine **xml**-Datei, die den **TransitSchedule** enthält
- einige spezifische Einstellungen in der Konfigurationsdatei
- einen **Controller** zur Ausführung der Simulation

3.2.1 Network

Netzwerkbeschreibungen in MATSim basieren auf Kanten (**Links**) und Knoten (**Nodes**). Ein **Link** verläuft hierbei linear zwischen zwei **Nodes**. Jeder **Link** eines **Networks** in MATSim verfügt über einen Eintrag, der die erlaubten Transitmodi angibt. Ist kein Modus spezifiziert geht die Simulation davon aus, dass ausschließlich der Modus **car** zulässig ist. Es ist stets möglich mehrere Modi anzugeben. Bei der Modellierung von PT ist beispielsweise das zusätzliche Setzen des Transportmodus **pt**, **bus** oder **train** sinnvoll.

Jeder **Link** in einem Netzwerk besitzt unter anderem folgende Attribute:

- **length**: Länge des **Links**, in MATSim üblicherweise in Meter
- **freespeed**: Geschwindigkeit, mit der auf dem **Link** gefahren werden kann
- **capacity**: Flusskapazität c_{flow} des **Links** in [Agenten pro Zeit]
- **permlanes**: Anzahl der Fahrspuren n_{lanes}

Die **CapacityPeriod** eines Netzwerks gibt an, auf welchen Zeitraum sich die Flusskapazitäten beziehen. Zudem verfügt jeder **Link** über eine Speicherkapazität **Storage Capacity**, die die maximale Anzahl der auf einem **Link** befindlichen Agenten angibt und wie folgt definiert ist:

$$c_{storage} = \frac{n_{lanes} * length}{7.5} . \quad (3.1)$$

3.2.2 Controller, ControllerListener und EventHandler

Der **Controller** ist in MATSim verantwortlich für die Simulationsdurchläufe inklusive der Initialisierung sämtlicher benötigter Daten, Durchführung der Iterationen und *Re-planning* und weiteren. Ein **Controller Listener** ermöglicht die Erfassung von **Controller Events**, die zum Beispiel am Ende einer Iteration auftreten (**Iteration Ends Event**). Mit einem **Event Handler** lassen sich beim Auftreten von definierten **Events** automatisch in der **handleEvent**-Methode implementierte Aktionen ausführen, etwa bei Ankunft eines Agenten am Zielort ein **Agent Arrival Event**.

3.2.3 Public Transport Vehicles

Die Beschreibung der PT **Vehicles** lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen. Im ersten Abschnitt werden die verschiedenen Fahrzeugtypen (**Vehicle Type**) beschrieben, während im zweiten Abschnitt die in der Simulation zu verwendenden Fahrzeuge (**Vehicle**) gelistet werden. Jedes **Vehicle** erhält eine eigene Kennung (**id**) und wird einem **Vehicle Type** zugeordnet. Die Erstellung einer solchen **xml**-Datei ist mit dem **VehicleWriterV1** möglich. Zwei **Vehicles** vom gleichen **Vehicle Type** können wie in *Listing 3.1* beschrieben realisiert werden.

Listing 3.1: vehicle1 und vehicle2 vom Typ 320

```

<vehicleType id="320">
  <description>Airbus A320 aircraft</description>
  <capacity>
    <seats persons="180"/>
  </capacity>
  <length meter="50.0"/>
</vehicleType>
<vehicle id="aircraft1" type="320"/>
<vehicle id="aircraft2" type="320"/>

```

3.2.4 Public Transport Schedule

Auch der **Transit Schedule** ist in mehrere Abschnitte gegliedert. Der erste Teil des **Transit Schedule** beschreibt die Haltestellen, an denen der öffentliche Verkehr halten soll. Um die Haltestellen (**Transit Stop Facility**) zu definieren müssen diese mit Koordinaten, einer Kennung und einer Referenz zu dem **Link** ausgestattet werden, auf dem die **Transit Stop Facility** liegt (siehe *Listing 3.2*). Die **Transit Stop Facility** kann nur von **Vehicles** angefahren werden, die auf dem entsprechenden **Link** verkehren. Die Angabe eines Namens ist optional möglich, ebenso die Angabe, ob das **Vehicle** eine **Lane** blockiert, während es an der **Transit Stop Facility** steht.

Listing 3.2: Liste von Haltestellen mit den drei Stop Facilities MUC, ZRH und TXL

```

<transitStops>
  <stopFacility id="MUC" x="50.0" y="20.5" linkRefId= "MUC"/>
  <stopFacility id="ZRH" x="100.0" y="20.5" linkRefId= "ZRH" isBlocking="
    false" />
  <stopFacility id="TXL" x="120.5" y="70.5" linkRefId= "TXL" name="Berlin
    -Tegel" />
</transitStops>

```

Im zweiten Abschnitt werden die **Transit Line** und die zugehörigen **Transit Routes** gelistet. Die **Transit Line** beschreibt die Linie, auf der Verkehr stattfindet, etwa eine Buslinie. Eine **Transit Route** stellt die Beschreibung der zu nutzenden Route dar und kann beispielsweise genutzt werden, wenn eine Linie mehrere Streckenabschnitte unabhängig voneinander bedient oder mehrere Linien dieselbe Route nutzen. Die **Transit Line** verfügt über eine **id**, die beispielsweise den Namen der Linie definieren kann. Innerhalb der **TransitLine** wird die **TransitRoute** aufgezeichnet, die den Modus der Route (**transport Mode**), das Routenprofil (**route Profile**), die Route im **Network** (**route**) und jede einzelne Abfahrt (**departure**) umfasst. Der **transport Mode** gibt an welche **Links** im Netzwerk genutzt werden können. Im **route Profile** werden alle Haltestellen gelistet, die von der Linie angefahren werden sollen, während die **route** jeden abzufahrenden **Link** enthält. Die **departures** sind eine Liste aller Abfahrten auf der betreffenden Linie und Route, die eine eigene **id**, eine Abfahrtszeit (**departure Time**)

und ein Fahrzeug zugewiesen bekommen, das die Fahrt durchführt und in der vormals definierten Auflistung der `Vehicles` enthalten ist. *Listing 3.3* zeigt ein Beispiel einer Linie mitsamt der genannten Attribute.

Listing 3.3: Beschreibung einer Linie von Berlin nach Zürich mit zwei Abflügen auf der direkten Route

```
<transitLine id="BerlinToZurich">
  <transitRoute id="TXLtoZRH">
    <transportMode>pt</transportMode>
    <routeProfile>
      <stop refId="TXL" arrivalOffset="00:00:00" departureOffset="00:00:00" />
      <stop refId="ZRH" arrivalOffset="00:00:00" departureOffset="00:00:00" />
    </routeProfile>
    <route>
      <link refId="TXL"/>
      <link refId="TXLtoZRH"/>
      <link refId="ZRH"/>
    </route>
    <departures>
      <departure id="01" departureTime="06:00:00" vehicleRefId="ac_1" />
      <departure id="02" departureTime="14:15:00" vehicleRefId="ac_2" />
    </departures>
  </transitRoute>
</transitLine>
```

3.2.5 Konfigurationsdatei

Um eine Simulation von PT in MATSim zu starten, wird eine Konfigurationsdatei benötigt, in der einige Einstellungen getätigt werden müssen, die von der standardmäßig gesetzten Konfiguration abweichen. *Listing 3.4* stellt die im Folgenden beschriebenen Einstellungen beispielhaft dar. Momentan unterstützt lediglich die `QSim` das PT Modul [55, vgl. Configuration]. Im `Scenario` müssen `Transit` und `Vehicles` aktiviert werden. Weiterhin ist es nötig, das Format der Ausgabe der `Events` auf `xml` zu setzen, da MATSim derzeit keine anderen Formate bei der PT Simulation unterstützt. Zuletzt folgt die Angabe der Dateipfade zu den Eingangsdaten für den PT Verkehr.

Listing 3.4: Auszüge der für Public Transport wichtigen Bestandteile einer Konfigurationsdatei

```
<module name="scenario">
  <param name="useTransit" value="true" />
  <param name="useVehicles" value="true" />
</module>
...
<module name="qsim">
  <param name="startTime" value="00:00:00" />
</module>
```

```
<param name="endTime" value="30:00:00" />
</module>
...
<module name="controler">
  <param name="eventsFileFormat" value="xml" />
</module>
...
<module name="transit">
  <param name="transitScheduleFile" value="transitschedule.xml" />
  <param name="vehiclesFile" value="transitVehicles.xml" />
  <param name="transitModes" value="pt" />
</module>
```

Kapitel 4

Analyse von Datenquellen für Flugbewegungen und Flughäfen

Für die Modellierung und Simulation von europaweiten Flügen werden anfänglich Datenquellen benötigt, die bestimmte Kriterien erfüllen. Hierzu zählen Vollständigkeit, eine einheitliche Datenstruktur, Aktualität und eine möglichst freie Zugänglichkeit und Verwendbarkeit.

4.1 Flugbewegungen

Es gibt eine Vielzahl von Quellen für Flugpläne und Luftfahrt Daten. Die automatisierte Erstellung einer Datenbank vollständigen Umfangs verlangt nach einer einheitlichen Struktur der Daten, um das automatische Einlesen der einzelnen Flüge möglichst unkompliziert gestalten zu können. Im Idealfall sollten die Daten komplett einheitlich formatiert und in einer einzigen Datei enthalten sein.

4.1.1 ICAO

Die ICAO veröffentlicht in regelmäßigen Abständen Berichte über die Entwicklung des internationalen Zivilluftverkehrs. Diese werden einerseits als Pressemitteilungen veröffentlicht und andererseits im Rahmen der ICAO Jahresberichte (*Annual Reports*). In Letzteren werden Angaben über absolute Passagierzahlen gemacht, Vergleiche zu Vorjahren gezogen und Prognosen geliefert. Der Schwerpunkt des Berichts liegt auf technischen Belangen [47].

Die statistischen Publikationen der ICAO umfassen kommerzielle Luftverkehrsunternehmen, Quell- und Zielverkehr, Verkehr an einzelnen Flughäfen und finanzielle Daten zum kommerziellen Luftverkehr [44]. Die Daten enthalten jeweils nur eine jährliche Zusammenfassung, die keine Rückschlüsse auf die Häufigkeit der Flugbewegungen oder gar den Flugzeugtyp zulässt. Flugplandaten sind bei der ICAO nicht einzusehen. Folglich

ist die ICAO als Datenquelle für die Erstellung einer Datenbank von Flugbewegungen ungeeignet.

4.1.2 IATA

Die IATA bietet im Rahmen ihrer Publikationen und *Business Intelligence and Statistics* detaillierte Verkehrsstatistiken, die die von Mitgliedern beförderten Passagiere und die beförderte Fracht umfassen. Diese Dienste sind kostenpflichtig [37].

Kostenfreie Informationsquellen sind unter anderem der Jahresbericht der IATA. Dieser liefert, ähnlich dem ICAO Jahresbericht, nur eine kleine Übersicht der weltweiten Passagierzahlen. Schwerpunktmäßig erstattet die IATA über aktuelle Projekte Bericht [42]. Die IATA stellt keine Flugpläne ihrer Mitglieder zur Verfügung. Mitglieder der IATA sind zudem zumeist *Network Carrier*, während *Low Cost Carrier* der Organisation nicht angehören. Der Anteil der Flugbewegungen der *Low Cost Carrier* in Europa ist mit 26% so hoch [17, S. 16], dass eine Erstellung einer Datenbank ohne diese ein sehr unrealistisches Szenario verursachen würde. Die IATA eignet sich folglich nicht als Datenquelle.

4.1.3 Airline-Flugpläne

Flugpläne der in Europa operierenden Fluggesellschaften bieten ein aktuelles und umfangreiches Datenangebot. Nahezu jede Fluggesellschaft bietet ihren Flugplan auf ihrer Internetpräsenz zum Download oder zur Ansicht an. Dabei unterscheiden sich die Flugpläne grundlegend in ihrem Format. Einige Fluggesellschaften stellen ihren gesamten Saisonflugplan als Gesamtangebot in einer Datei zum Download bereit, wie zum Beispiel die Deutsche Lufthansa [15]. Bei anderen, zum Beispiel Ryanair [66], muss jede Strecke manuell in einer Online-Abfrage eingetragen werden um Flugplandaten zu erhalten. Die große Anzahl der europäischen Airlines und die damit verbundene große Anzahl verschiedener Datenformate machen die Erstellung einer einheitlich formatierten Datenbank zu einer komplexen Aufgabe, die sich entweder durch manuelles Eintragen jedes einzelnen Fluges oder unter Zuhilfenahme diverser verschiedener **Parser** bewerkstelligen ließe. Die händische Eingabe aller europaweiten Flüge, im September 2009 nach Angaben von Eurocontrol 28842 pro Tag [26, S. 13], wäre mit erheblichem Aufwand verbunden. Selbst bei Nutzung diverser **Parser** zum Einlesen der Daten wäre der Zeitaufwand bei weit mehr als 35 Linienfluggesellschaften [4] immens, sodass sich auch diese Option als nur bedingt geeignet herausstellt.

4.1.4 Airport-Flugpläne

Airport-Flugpläne und Airline-Flugpläne sind im Format und der Verfügbarkeit sehr ähnlich. Die über Airline-Flugpläne getroffenen Aussagen treffen für veröffentlichte

Flugpläne der Flughäfen ebenso zu, weshalb sich auch diese nur als bedingt geeignet für die Erstellung der einer europaweiten Flugdatenbank erweisen.

4.1.5 Statistisches Bundesamt

Das Statistische Bundesamt bietet im Rahmen des destatis Publikationsservice eine „Nachweisung des Personen-, Güter- und Postverkehrs mit Luftfahrzeugen sowie Starts und Landungen nach Flughäfen“. Diese wird unter dem Titel „Luftverkehr – Fachserie 8 Reihe 6“ auf der Internetseite von destatis monatlich veröffentlicht [68]. Die Datei umfasst eine Auflistung der Anzahl der gestarteten und gelandeten Luftfahrzeuge, einsteigende und aussteigende Passagiere sortiert nach Flughafen, Daten zur Verkehrsleistung und eine Auflistung von Ein- und Aussteigern von Herkunftsflugplatz zu Zielflugplatz. Die Datei ist sowohl als PDF, als auch als Excel-Spreadsheet kostenfrei verfügbar. Es können keine Rückschlüsse auf einzelne Flugbewegungen gezogen werden. Die Erstellung einer Datenbank von Flugbewegungen ist mit den bei destatis verfügbaren Daten nicht möglich. Destatis stellt eine jedoch umfangreiche Quelle für Passagierströme von und nach Deutschland dar, die für eine Simulation mit MATSim von Nutzen sein könnte.

4.1.6 CFMU

Bei der CFMU gehen die ATC-Flugpläne jedes einzelnen Fluges nach Instrumentenflugregeln im europäischen Luftraum ein, dort sind folglich sämtliche kommerzielle Flugbewegungen verzeichnet. Die Datensätze, die der CFMU übermittelt werden, enthalten neben für den in veröffentlichten Flugplänen von Airlines und Flughafenbetreibern, das Routing im ATS-Routennetz, die geplante Flughöhe und diverse weitere Informationen, die lediglich für die Flugsicherung, Airlines und Flughafenbetreiber relevant sind. Die kostenpflichtige Anmeldung zur Nutzung dieser Datenbank ist den bisher genannten vorbehalten [25].

4.1.7 Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025

Während sich die Prognose 2025 der Verkehrsverflechtungen Deutschlands ausführlich mit dem Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehrsnetz auseinandersetzt, findet keine detaillierte Analyse des Luftverkehrsnetzes statt. Die Aufarbeitung und Aktualisierung des Luftverkehrsnetzes sei nicht Bestandteil der Untersuchung, weshalb sich die Relevanz des Luftverkehrs in der Untersuchung auf Flughäfen als Um- und Einstiegspunkte des Straßen- und Schienenverkehrs beschränke. Das Erstellen einer Flugdatenbank oder eines Luftverkehrsnetzes ist mit der Prognose 2025 nicht möglich [48, S. 86].

4.1.8 Global Distribution Systems und das KVS Tool

Global Distribution Systems (GDS) ermöglichen Abfragen von Flügen und verfügbaren Sitzplätzen in Echtzeit und werden vor allem von Reisebüros, Fluggesellschaften, Mietwagenanbietern und Hotels genutzt [51, GDS]. Eine weitere Funktionalität ist die Möglichkeit des Zugriffs auf aktuelle Flugpläne der Fluggesellschaften, sofern diese in die GDS eingespeist wurden. Abfragen erfolgen unter Eingabe des Start- und Ziel-flughafens, sowohl für die Verfügbarkeits- als auch für die Flugplananfrage. Es ist die manuelle Eingabe sämtlicher Flugstrecken, die betrachtet werden sollen, nötig. Ein Werkzeug zur Abfrage stellt das von Vielfliegern für Vielflieger entwickelte KVS Tool dar. Es handelt sich hierbei um ein auf dem Computer zu installierendes Programm mit einfacher Eingabemaske, ähnlich der Eingabemasken in Reisebüros. Das KVS Tool liefert die Ergebnisse im Ausgabefeld in reiner Textform, wobei einzelne Einträge jeweils durch einen Tabulatoreinzug getrennt sind [49]. Prinzipiell käme das KVS Tool als Datenquelle in Betracht. Flugpläne und Verfügbarkeiten der *Low Cost Carrier* sind jedoch meist nicht in den GDS gelistet [69, S. 245], weshalb ein maßgeblicher Teil aller Flugverbindungen mit dem KVS Tool nicht abfragbar wäre. Ergänzend hierzu sind im GDS eine Vielzahl von *Codeshare*-Verbindungen gelistet, was zu doppelten Einträgen führt und die Filterung erschwert. Der hohe Arbeitsaufwand, der mit der Eingabe jedes einzelnen Städtepaars verbunden ist, erschwert die Erstellung einer einzelnen Datenbank zusätzlich, weshalb das KVS Tool nur eine geringe Eignung aufweist.

Eine Möglichkeit GDS oder das KVS Tool zu nutzen, könnte das Erstellen eines sogenannten *Scripts* oder *Bots* sein, das eine Reihe von Abfragen ausführen kann, ohne dass der Benutzer eingreifen muss, und diese in eine Datenbank speichert. Hierbei wäre zu beachten, dass eine einzelne Abfrage mit dem KVS Tool bis zu einer Minute dauern kann.

4.1.9 OAG Aviation

OAG Aviation bezeichnet sich selbst als den führenden Dienstleister in der Bereitstellung und Analyse von Luftfahrt Daten. OAG bietet gegen Entgelt eine Vielzahl von Datensätzen und Online-Datenbanken, darunter Flugpläne, Flughafendaten und Flottenlisten. Der Datensatz *OAG World Direct Flights* (WDF) bietet eine Auflistung aller weltweiten Flüge für einen angefragten Zeitraum, der von einem Monat bis über mehrere Jahre reichen kann. Laut OAG umfasst die Auflistung alle Passagier- und Frachtflüge, die im bestellten Zeitraum geplant waren. Die Datenbank wird stets auf dem aktuellen Stand gehalten. Der Datensatz kann sogar Flugplandaten bis zu einem Jahr im Voraus enthalten, falls entsprechende Flugpläne bereits von den Fluggesellschaften herausgegeben wurden [60]. Die OAG WDF Daten sind nur käuflich zu erwerben. Für Bildungs- und Forschungszwecke gibt es akademische Lizenzen zu einem reduzierten Preis.

4.1.10 Auswahl der Datenquelle für Flugbewegungen

Die OAG WDF erweist sich als die am besten geeignete Quelle. Die Datenbank ermöglicht eine Verarbeitung der Daten mit nur einem einzigen **Parser**, was den Aufwand der Erstellung einer Datenbank nach Benutzerbedürfnissen aus der OAF WDF Datei gering hält. OAG WDF stellt mit Abstand die umfangreichste Quelle dar und enthält unter anderem folgende Einträge:

- **Carrier Code** – IATA-Code der Fluggesellschaft
- **Flight Number** – Flugnummer bestehend aus 1 bis 4 Zahlen
- **Airport Codes** – IATA-Flughafencode des Start- und Zielflughafens
- **Country Codes** – ISO-Ländercodes des Start- und Ziellandes
- **Departure Time, Arrival Time, Elapsed Time** – Abflug-, Ankunfts- und Flugzeit
- **Days of Operation** – Verkehrstage, an denen der Flug ausgeführt wird
- **Aircraft Type** – IATA-Code des Flugzeugtyps
- **Available Seats** – Sitzplatzanzahl des Flugzeugs
- **Distance** – Entfernung zwischen Start- und Zielflughafen in *Statute Miles*
- **Operating/Non Operating Marker** – Gibt an, ob die Fluggesellschaft fraglichen den Flug ausführt
- **Duplicate Carrier/Duplicate Flight** – Auflistung aller *Codeshare*-Fluggesellschaften und Flugnummern, unter denen der Flug durchgeführt wird

Die Filterung nach Start- und Zielland und Verkehrstag wird mit diesen Einträgen ermöglicht. Auch das Herausfiltern des *Marketing Carriers*, wenn dieser nicht *Operating Carrier* ist, bei *Codeshare*-Flügen ist mit diesen Einträgen machbar. Somit lässt sich die Datenbank derart gestalten, dass nur tatsächlich durchgeführte Flüge unter der Flugnummer der ausführenden Fluggesellschaft enthalten sind.

4.2 Flughafendaten

Für die Erstellung einer Flughafendatenbank sind zunächst in erster Linie zwei Informationen relevant: Der IATA-Flughafencode und die Koordinaten des Flughafens. Es gibt eine Vielzahl von frei verfügbaren Quellen für Flughafenkoordinaten. Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die Eignung ausgewählter Quellen ermöglichen.

4.2.1 Static Info Tables Airports im TYPO3 Extension Repository

Im *Extension Repository* der *TYPO3 Association* findet sich eine zuletzt im Jahr 2003 aktualisierte SQL-Datenbank mit Flughafendaten, die die im Wesentlichen benötigten Bestandteile IATA-Flughafencode und Koordinaten enthält. Eine Stichprobe des Autors ergab jedoch, dass die Datenbank aufgrund der nicht gegebenen Aktualität einige Flughäfen von erheblicher Relevanz für den heutigen Luftverkehr nicht enthält. Die Datenbank eignet sich in der vorhandenen, unvollständigen Form nicht für die Erstellung eines Netzwerks [64].

4.2.2 Great Circle Mapper

Der *Great Circle Mapper* ist eine internetbasierte Weltkarte, auf der sich Flugpfade, Flugentfernungen und Flughafeninformationen abrufen lassen. Die Abfrage *Airport Info* ermöglicht unter anderem den Zugriff auf Informationen zu Flughafenbezeichnung, Start- und Landebahnen und Koordinaten des Flughafens. Eine automatisierte Abfrage dieser Daten ist den Recherchen des Autors zufolge nicht möglich, müsste also für jeden Flughafen manuell durch Eingabe des IATA-Flughafencodes auf <http://www.gcmap.com/> erfolgen. Der *Great Circle Mapper* eignet sich folglich nur für die Erstellung einer Datenbank mit geringem Umfang oder für die Ergänzung einer vorhandenen Datenbank, bei der der manuelle Nachtrag von vertretbarem Aufwand ist. Für die automatisierte Abfrage kommt die Erstellung eines *Scripts* oder *Bots* in Frage, da die Datenstruktur des *Great Circle Mappers* einheitlich gestaltet ist.

4.2.3 Aeronautical Information Publication (AIP)

Aeronautical Information Publication ist das Luftfahrthandbuch, in dem alle für die Luftfahrt wichtigen Bestimmungen eines Landes gelistet sind. Das AIP wird von der Flugsicherung veröffentlicht. Es ist in drei Abschnitte unterteilt, die Folgendes umfassen:

- GEN – *General* – Allgemeine Informationen zur Luftfahrt
- ENR – *Enroute* – Informationen und Karten für den Streckenflug
- AD – *Aerodromes* – Informationen und Karten zu An- und Abflug und Flughäfen

Da das AIP von offizieller Stelle veröffentlicht wird, kann von der Richtigkeit der Daten ausgegangen werden. Die AD-Karten enthalten neben Lageplänen des Flughafens und Informationen zu Start- und Landebahnen auch die Koordinaten des Flughafens. Das AIP kann entweder käuflich erworben werden oder über das *EAD Basic* Portal [27] der EUROCONTROL kostenfrei abgerufen werden. *EAD Basic* richtet sich in erster

Linie an Privatpiloten, Flugschulen und Luftfahrtinteressierte. Eine Anmeldung ist erforderlich. Nach erfolgreicher Anmeldung besteht über ein Login in die Datenbank die Möglichkeit auf das gesamte AIP der EUROCONTROL zuzugreifen, wobei jedes Dokument einzeln geöffnet werden muss. Eine Recherche von Koordinaten ist folglich nur von Hand möglich, was bei einem größeren Umfang der benötigten Daten mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist.

4.2.4 OpenStreetMap

Die *Open Source* Weltkarte *OpenStreetMap* (OSM) bietet eine Vielzahl von geographischen Daten, „über Straßen, Eisenbahnen, Flüsse, Wälder, Häuser und alles andere, was gemeinhin auf Karten zu sehen ist“ [61]. OSM ermöglicht den Abruf und die Erstellung von Flughafen-daten. Hierzu werden OSM *Nodes*, *Ways* und *Areas* mit dem Schlüssel (*Key*) *aeroway* versehen. Durch die Nutzung dieses *Tags* lassen sich Flughafen-daten aus der gesamten Datenbank extrahieren. Die *aeroway Tags* in OSM können die folgenden Werte *Value* zugewiesen bekommen:

- *aerodrome* – Flughafen
- *terminal* – Flughafen-Abfertigungsgebäude
- *helipad* – Start- und Landeplatz für Helikopter
- *runway* – Start- und Landebahn für Flugzeuge
- *taxiway* – Verbindung zwischen Flughafen-vorfeld und Start-/Landebahn
- *apron* – Flughafen-vorfeld mit Parkpositionen für Luftfahrzeuge
- *gate* – Flugsteige des Flughafens

Am Beispiel des Flughafen München werden im Folgenden die einzelnen *Tags* eines Flughafen-*Nodes* in OSM erläutert.

```
<node id='26608310' lat='48.3540252' lon='11.7881069' user='robome'  
  timestamp='2010-04-04T12:19:38Z' uid='81175' version='13' changeset='4322207'>
```

Das *Start Tag* enthält eine *id* zur eindeutigen Identifikation der *Nodes*, *lat* und *lon* geben Aufschluss über Breitengrad und Längengrad, *user*, *timestamp*, *uid*, *version*, *changeset* enthalten Informationen über den Benutzer, der den Datensatz verändert oder erstellt hat, sowie über Erstellungs- und Änderungsdatum. Für die Erstellung des MATSim-Netzwerks sind nur die Koordinaten relevant, eine *id* wird dem Flughafen entsprechend dem IATA-Code zugewiesen.

```
<tag k='aeroway' v='aerodrome' />
```

Das *Tag* `aeroway` mit dem entsprechenden Wert enthält die Information, um welche Art von Infrastruktur es sich handelt. Zunächst haben nur Flughäfen eine Relevanz.

```
<tag k='ele' v='453'/>
```

`ele` gibt die Höhe über dem Meeresspiegel (*Elevation*) in Metern an und ist für die Erstellung des Netzwerks nicht von Bedeutung.

```
<tag k='iata' v='MUC'/>
```

Der IATA-Code des Flughafens wird mit dem *Key* `iata` gekennzeichnet, der *Value* ist der IATA-Code des Flughafens. Dieses *Tag* ist bei einer Vielzahl von Flughafen-*Nodes* gesetzt, dennoch gibt es eine beträchtliche Anzahl von Flughafen-*Nodes*, die in OSM nicht mit einem solchen Eintrag versehen sind.

```
<tag k='icao' v='EDDM'/>
```

Der ICAO-Flughafencode ist für die Erstellung des Netzwerks irrelevant.

```
<tag k='is_in' v='DE'/>
```

Das *Tag* `is_in` gibt an, in welchem Land sich der Flughafen befindet. Im Idealfall geschieht dies über den ISO-Ländercode, die Einträge sind jedoch in OSM uneinheitlich ausgefüllt. Ausgeschriebene Länderbezeichnungen sind nicht unüblich. Eine Filterung nach Ländern ist folglich nicht direkt möglich, deshalb erfolgt die Filterung der europäischen Flughäfen nicht über die OSM-Daten, sondern in der Verarbeitung der OAG WDF Datenbank, siehe Kapitel 5.2.

```
<tag k='name' v='Flughafen München Franz Josef Strauß'/>  
<tag k='name:de' v='Flughafen München Franz Josef Strauß'/>  
<tag k='name:en' v='Munich International Airport'/>
```

Der Name des Flughafens ist unter dem Schlüssel `name` gespeichert, wobei die Erweiterung `:de` und `:en` die Sprache des Eintrags (hier: deutsch und englisch) angibt.

```
<tag k='operator' v='Flughafen München GmbH'/>
```

Hinter dem `operator` verbirgt sich die Betreibergesellschaft des Flughafens, welche bei der Erstellung des Netzwerks ebenfalls keine Rolle spielt.

```
<tag k='source' v='wikipedia'/>
```

Unter `source` ist die Quelle der eingetragenen Daten vermerkt.

```
<tag k='type' v='public'/>
```

`type` gibt an, ob der Flughafen öffentlich (`public`) oder nicht-öffentlich (`private`) ist. Hierzu siehe Kapitel 2.4.2.

```
<tag k='wikipedia:en' v='Munich_Airport'/>
```

Dieser Eintrag enthält gibt die Bezeichnung des Artikels bei Wikipedia an, der das entsprechende Element behandelt. Auch dieses Feld ist nicht relevant für die Generierung des Netzwerks.

`</node>`

Bei `</node>` handelt es sich um das *End Tag*, das den Abschluss des Eintrags bildet.

Mittels der *Tag Query* (Abfrage von *Nodes* eines definierten Typs) der *OSM Extended API* (Xapi) [62] lassen sich einzelne Typen von *Nodes* aus der Kartendatenbank von OSM extrahieren. Um die Abfrage der *aeroway-Nodes* auszuführen kann die URL [http://www.informationfreeway.org/api/0.6/node\[aeroway\]](http://www.informationfreeway.org/api/0.6/node[aeroway]) aufgerufen werden. Das Resultat der Abfrage wird als xml-Datei gespeichert. Eine Stichprobe des Autors ergab, dass OSM wesentliche Verkehrsknotenpunkte im Luftverkehr umfasst und lediglich kleinere Flughäfen von geringerer Bedeutung nicht enthalten sind.

Neben der Xapi-Abfrage gibt es auch die Möglichkeit eine komplette Weltkarte oder einzelne Länder oder Kontinente als OSM-Datei herunterzuladen. Die *aeroway*-Elemente sind dort ebenfalls enthalten. Die Dateigröße einer solchen kompletten OSM-Datei ist allerdings um ein Vielfaches größer, als das Resultat einer Xapi-Abfrage.

4.2.5 Auswahl der Datenquelle für Flughafendaten

Um eine möglichst vollständige und beliebig erweiterbare Datenbank zu erstellen bietet es sich an eine Quelle zu wählen, die bereits einen großen Umfang besitzt. Diese wären der *Great Circle Mapper*, das AIP und OpenStreetMap. Der *TYPO3* Datensatz verfügt über zu viele Lücken und wird offensichtlich nicht regelmäßig auf den neuesten Stand gebracht. Beim AIP ist eine manuelle Eingabe der Daten möglich. Der damit verbundene Aufwand lässt die Nutzung des AIP als wenig sinnvoll erscheinen. Der *Great Circle Mapper* ist zwar die umfangreichste Quelle für Flughafendaten, jedoch ist die Erstellung eines *Skripts* zur automatisierten Abfrage der Daten im Verhältnis zur bereits implementierten Abfragemöglichkeit in OpenStreetMap als zu aufwendig zu bewerten. Überdies bietet MATSim einen *Parser* zum Einlesen einer solchen OSM-Datei, den *MatsimXmlParser*. Schlussfolgernd wird das MATSim-Netzwerk bei diesem Ansatz mit OpenStreetMap erstellt.

Kapitel 5

Modellierung und Simulation des europäischen Linien-Luftverkehrs

Zur Modellierung des europäischen Luftverkehrs wurden einige Vereinfachungen und Voraussetzungen getroffen, die im folgenden Kapitel erörtert werden. Weiterhin wird die Erstellung der Flugdatenbank aus dem OAG WDF und des MATSim-Netzwerks aus der OSM-Datei erläutert und die Umsetzung in JAVA dargelegt.

5.1 Rahmenbedingungen

Der September stellt im Luftverkehr in der Regel den am stärksten nachgefragten Reisemonat dar [69, S. 15]. Deshalb wurde der Zeitraum September 2009 als Basis gewählt und eine entsprechende OAG WDF Datenbank beschafft. Zur Komplexitätsverringern wird davon ausgegangen, dass an allen Wochentagen in etwa gleich viele Flüge durchgeführt werden und folglich die Flüge eines einzelnen Verkehrstages als Grundlage für die Erstellung der Flugdatenbank und des Netzwerks dienen können. In der Realität sind Montag und Freitag die am stärksten nachgefragten Wochentage für Geschäftsreisende, während dies bei Urlaubsreisen Samstag und Sonntag sind [69, S. 16]. Als Verkehrstag wird Dienstag ausgewählt, weil der 1. September 2009 ein Dienstag war.

In die Flugdatenbank aufgenommen werden sollen alle Flüge aus der OAG WDF Datenbank, die in Europa starten und enden. Hierzu wird die eine Europadefinition anhand der von der Europäischen Union [30] gelisteten europäischen Länder und der ISO 3611-1 [22, S. 14ff] festgelegt:

- AD – Andorra
- AL – Albanien
- AM – Armenien
- AT – Österreich
- AX – Ålandinseln
- AZ – Aserbaidshan
- BA – Bosnien und Herzegowina
- BE – Belgien

- BG – Bulgarien
- BY – Belarus
- CH – Schweiz
- CY – Zypern
- CZ – Tschechische Republik
- DE – Deutschland
- DK – Dänemark
- EE – Estland
- ES – Spanien
- FI – Finnland
- FO – Färöer
- FR – Frankreich
- GB – Vereinigtes Königreich
- GI – Gibraltar
- GE – Georgien
- GG – Guernsey
- GR – Griechenland
- HR – Kroatien
- HU – Ungarn
- IE – Irland
- IM – Insel Man
- IS – Island
- IT – Italien
- JE – Jersey
- KZ – Kasachstan
- LI – Liechtenstein
- LT – Litauen
- LU – Luxemburg
- LV – Lettland
- MC – Monaco
- MD – Republik Moldau
- ME – Montenegro
- MK – Mazedonien
- MT – Malta
- NL – Niederlande
- NO – Norwegen
- PL – Polen
- PT – Portugal
- RO – Rumänien
- RS – Serbien
- RU – Russische Föderation
- SE – Schweden
- SI – Slowenien
- SJ – Svalbard und Jan Mayen
- SK – Slowakei
- SM – San Marino
- TR – Türkei
- UA – Ukraine
- VA – Vatikanstadt

Weitere getroffene Festlegungen und Vereinfachungen werden in den folgenden Abschnitten über die Erstellung der Flugdatenbank und des Luftverkehrsnetzwerks beschrieben.

5.2 Erstellung der Flugbewegungs-Datenbank

Ein entscheidender Schritt bei der Modellierung europaweiter Flugbewegungen ist die Erstellung einer Datenbank, die auf die Rahmenbedingungen der Simulation zugeschnitten ist. Diese vereinfacht das im Anschluss anzulegende Netzwerk und die Erzeugung des **Transit Schedule** in MATSim. Entsprechend der festgelegten Rahmenbedingungen soll die Datenbank ausschließlich Flüge innerhalb des definierten, europäischen Gebietes enthalten. Um dies zu erreichen, werden im ersten Schritt sämtliche Flugbewegungen, die nicht in Europa starten und landen, herausgefiltert. Des Weiteren sind für eine Simulation der Flugbewegungen in MATSim bei weitem nicht alle Daten nötig, die in der OAG WDF Datenbank enthalten sind. Um das **Public Transport** Modul in MATSim nutzen zu können, bedarf es zunächst lediglich folgender Einträge der OAG WDF Datenbank:

- Start- und Zielflughafen
- ausführende Fluggesellschaft
- Flugnummer
- Abflugzeit (Lokalzeit)
- Flugdauer
- Flugzeugtyp
- Sitzplatzkapazität des Flugzeugs
- Entfernung zwischen Start- und Zielflughafen

Für sämtliche Flüge zwischen identischen Start- und Zielflughäfen wird eine gleiche Reisezeit angenommen, um die Reisegeschwindigkeit für jedes Flughafenpaar jeweils pro Flugrichtung übereinstimmend zu definieren. Alle Flugzeiten werden in Lokalzeit angegeben, was zu Abweichungen vom realen Luftverkehrsaufkommen zu einer bestimmten Zeit führen kann. Die Festlegung einer Ankunftszeit ist im `TransitSchedule` nicht vorgesehen.

Es soll sichergestellt sein, dass sämtliche Flüge nur einen Eintrag in der Flugdatenbank bekommen und keine doppelten Einträge durch *Codeshare*-Flüge entstehen. Folglich müssen *Codeshares* herausgefiltert werden. Die gefilterten Daten werden nach Abschluss der Filterung in eine separate Datei gespeichert. Weitere Details hierzu werden im Abschnitt 5.4.2 erläutert.

5.3 Erstellung des Luftverkehrsnetzwerks

Um eine Simulation in MATSim durchführen zu können, bedarf es eines Netzwerks im xml-Format entsprechend der für MATSim-Netzwerke definierten `Document Type Description` (DTD) [54]. Die Annahmen zur Erstellung eines solchen Netzwerks für den europäischen Luftverkehr, die die Modellierung vereinfachen sollen, werden im Folgenden beschrieben.

Zunächst soll das Netzwerk lediglich aus direkten Verbindungen zwischen zwei Flughäfen bestehen, zwischen denen in der OAG WDF Datenbank tatsächlich Flugbewegungen gelistet sind. Abbildung 5.1 veranschaulicht dies.

Die Flughafeninfrastruktur wird auf eine Startbahn, eine Landebahn, ein Flughafenvorfeld (*Apron*), einen *Taxiway* vom Flughafenvorfeld zur Startbahn und einen *Taxiway* von der Landebahn zum Flughafenvorfeld simplifiziert (siehe Abbildung 5.2). Das

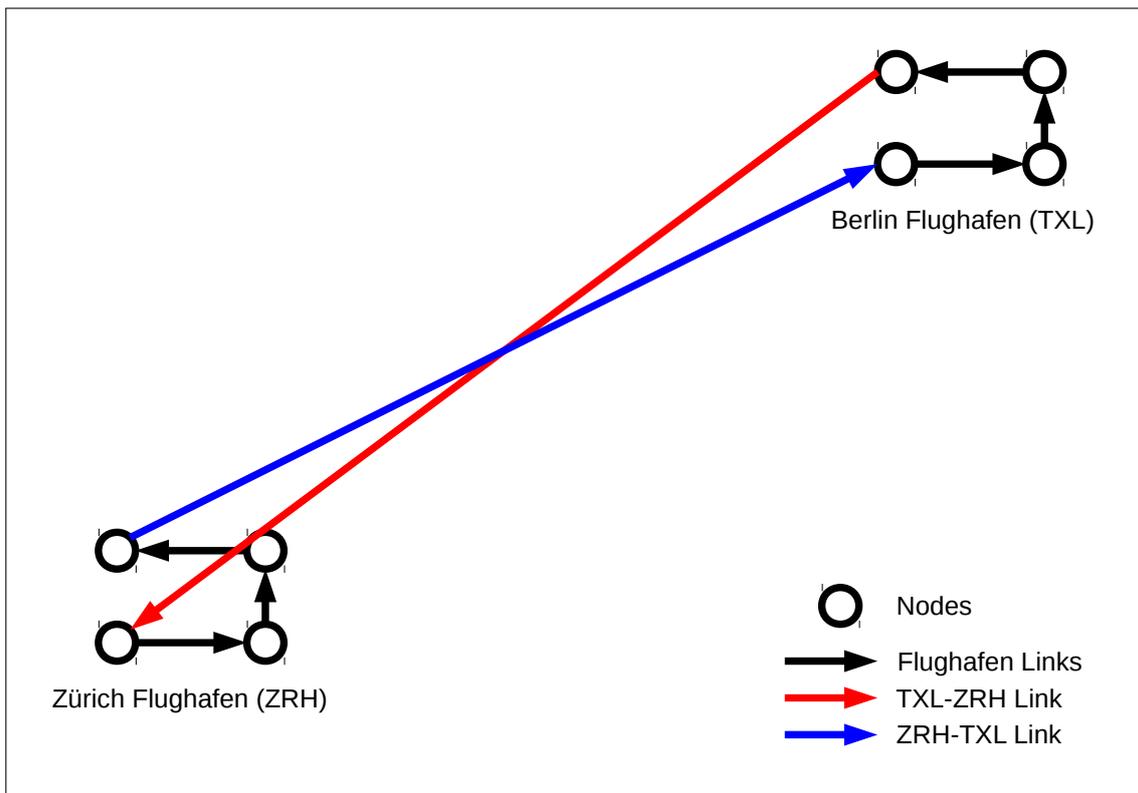


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Verbindung Berlin-Zürich mit je einem direkten Link zwischen Start- und Ziel für beide Flugrichtungen und vereinfachter Flughafeninfrastruktur bestehend aus Start- und Landebahn sowie einem *Taxiway* [Eigene Darstellung]

Flughafenvorfeld dient hierbei ausschließlich als Parkplatz für gelandete Flugzeuge und wird die Haltestelle für die Simulation mit dem **Public Transport** Modul in MATSim beherbergen. Die Verbindung zweier Flughäfen erfolgt jeweils zwischen der Startbahn (*Outbound Runway*) des Startflughafens und der Landebahn (*Inbound Runway*), die beide über *Taxiways* mit dem Flughafenvorfeld verbunden sind. Die Entfernung zwischen Start- und Zielflughafen wird aus der OAG WDF entnommen und in von *Statute Miles* in Kilometer umgerechnet. Die Reisegeschwindigkeit auf den Verbindungen zwischen Start- und Zielflughafen wird aus der Reisezeit und der Entfernung berechnet, die in der OAG WDF enthalten sind. So kann gewährleistet werden, dass die Ankunftszeit in der Simulation nahezu mit der in der OAG WDF angegebenen Zeit übereinstimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Zeit für den *Taxi*-Vorgang zehn Minuten (600 Sekunden) der Gesamtflugzeit ausmacht. Folglich wird bei der Berechnung der Reisegeschwindigkeit von einer $Nettoflugzeit = Gesamtflugzeit_{OAG} - 10min$ ausgegangen. Die Kapazitäten des Netzwerks werden so definiert, dass pro Minute ein Start und eine Landung möglich sind. Auf der Startbahn und dem *Inbound Taxiway* soll sich jeweils nicht mehr als ein Flugzeug befinden dürfen, um eine Kapazitätsbeschränkung modellieren zu können. Auf den Links zwischen Start- und Zielflughäfen besteht eine rein

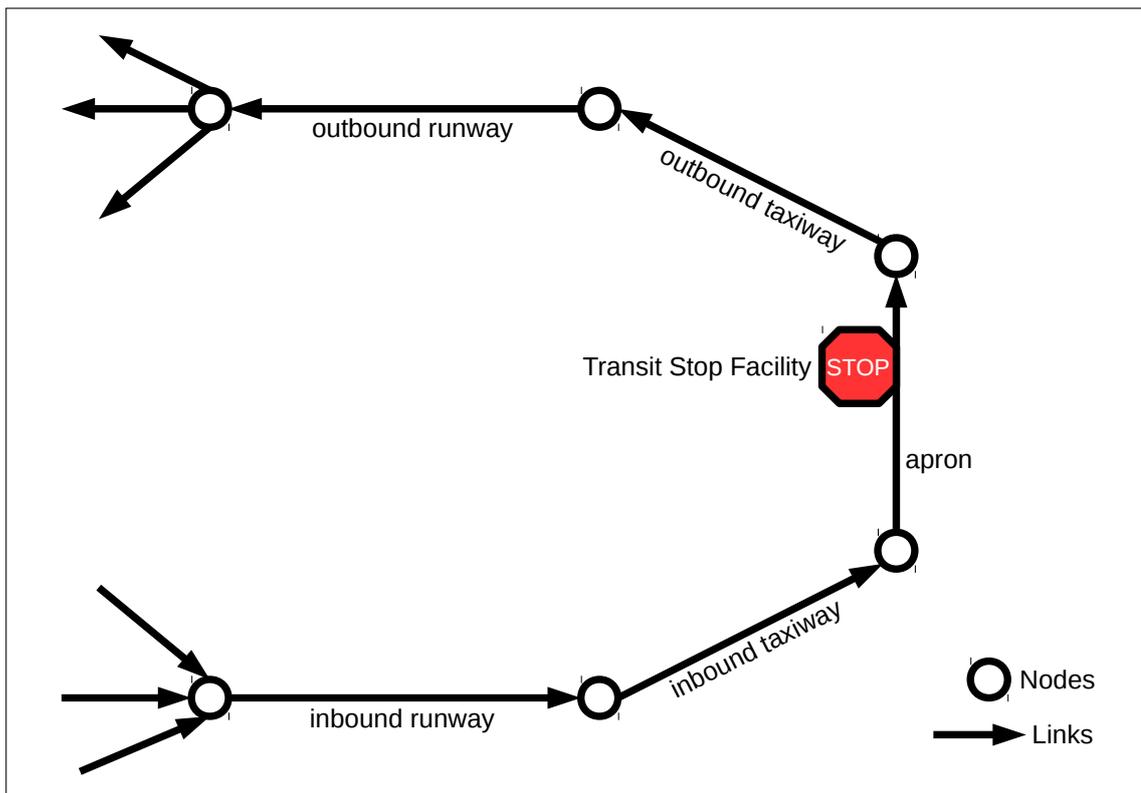


Abbildung 5.2: Prinzipskizze der Flughafeninfrastruktur [Eigene Darstellung]

hypothetische Beschränkung der Kapazität auf eine Flugbewegung pro Sekunde.

Um eine Kapazitätsbeschränkung im Bereich der Flughäfen zu erreichen muss die *Storage Capacity* der zu beschränkenden *Links* auf den Wert 1 gesetzt werden. Die *CapacityPeriod* wird später im *Network* auf 1.0 gesetzt, was zur Folge hat, dass alle angegebenen Flusskapazitäten sich auf eine Sekunde beziehen. Für beide *Runways* und die *Taxiways* wird die *Flow Capacity* auf $\text{capacity} = c_{\text{flow}} = \frac{1}{60}$ festgelegt, wodurch pro Minute ein Agent die entsprechenden *Links* verlassen kann. Für die Startbahn ergibt sich mit $\text{length} = 1500.0$ für die *Storage Capacity* (Definition siehe Formel 3.1):

$$c_{\text{storage}} = 1 = \frac{n_{\text{lanes}} * \text{length}}{7.5} = \frac{n_{\text{lanes}} * 1500.0}{7.5} = \frac{\frac{1}{200} * 1500.0}{7.5}.$$

Es gilt also: $c_{\text{storage}} = 1$ und $n_{\text{lanes}} = \frac{1}{200} = 0.005$. Die *Inbound Runway* erhält eine identische Länge, jedoch keine Beschränkungen der *Storage Capacity*. Letztere würden dazu führen, dass sich bei Kapazitätsengpässen ein Stau direkt vor Beginn der *Runway* bilden würde. Zwar bilden sich in der Realität Kapazitätsengpässe in der Luft, deren Konsequenz das Fliegen von Warteschleifen ist, allerdings ist ein Stehenbleiben in der Luft kurz vor der Landebahn realitätsfern. Es gilt deshalb die Annahme, dass es auf der *Inbound Runway* zu einem Stau kommen darf, indem die *Storage Capacity* des *Inbound Taxiways* beschränkt wird. Es soll für den *Inbound Taxiway* gelten: $c_{\text{storage}} = 1$,

$length = 500.0$. Um diese Festlegungen zu erreichen muss die Anzahl der Fahrspuren auf $n_{lanes} = \frac{3}{200} = 0.015$ festgelegt werden, so dass sich ergibt:

$$c_{storage} = 1 = \frac{n_{lanes} * length}{7.5} = \frac{\frac{3}{200} * 500.0}{7.5}.$$

Somit wird erreicht, dass sich jeweils nur ein Agent auf dem Link bewegt und ein Eintreffen von Flugzeugen im Minutentakt simuliert wird.

5.4 Implementierung in JAVA

Dieser Abschnitt beschreibt die Umsetzung der Erstellung in JAVA und liefert detailliertere Angaben zu den in den einzelnen JAVA-Klassen angenommenen Vereinfachungen. Die hier genannten JAVA-Klassen sind im MATSim-playground unter fuerbas [36] bzw. in MATSim zu finden.

5.4.1 Erstellung der Flughafendatenbank

Die Klasse `SfOsmAerowayParser` ist von der Klasse `MatsimXmlParser` abgeleitet und von der Funktionalität auf die Bedürfnisse zur Erstellung eines Netzwerks von Flughäfen beschränkt. Um die Erstellung der Flughäfen im Netzwerk automatisieren zu können, wurde die Klasse `SfMatsimAirport` (vgl. Abschnitt 5.4.3) entworfen. Zur Filterung der OSM-Daten durchläuft der `Parser` jedes einzelne `Tag` in der Eingangsdatei. Alle Datensätze, die keine `node` sind werden übersprungen. Da der IATA-Code als `id` für die `Node` im MATSim-Netzwerk übernommen werden soll können Flughäfen ohne gesetztes `iata Tag` nicht in das Netzwerk aufgenommen werden. Abbildung 5.3 zeigt die prinzipielle Funktionsweise der `SfAerowayParser`-Klasse auf. Eine Filterung nach Ländern erfolgt bei der Erstellung der Flughafendatenbank nicht, da für die Simulation relevante Flughäfen anhand der Flugbewegungsdatenbank ausgewählt werden. Sämtliche in OSM enthaltene Flughäfen werden mit IATA-Code und Koordinaten in ein Textdokument geschrieben.

5.4.2 Erstellung der Flugbewegungsdatenbank

Abbildung 5.4 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Erstellung der Flugbewegungsdatenbank, die mit der Klasse `SfAirScheduleBuilder` realisiert wird. Mit den vom `SfAerowayParser` eingelesenen Flughäfen ist ein Datenabgleich mit der OAG WDF Datenbank möglich, die Flug für Flug bzw. Zeile für Zeile mit einem `BufferedReader` eingelesen wird. Stimmt der Ländercode des Start- oder Ziellandes nicht mit den gelisteten Codes überein wird der Flug übersprungen. Um `Codeshares` zu eliminieren wird abgefragt, ob entweder keine `Codeshare`-Flugnummern eingetragen oder der `Operating Marker` auf 0 gesetzt ist. Trifft dies zu werden die weiteren relevanten Einträge in lokalen Variablen gespeichert und teilweise modifiziert. So wird beispielsweise die Abflugzeit und

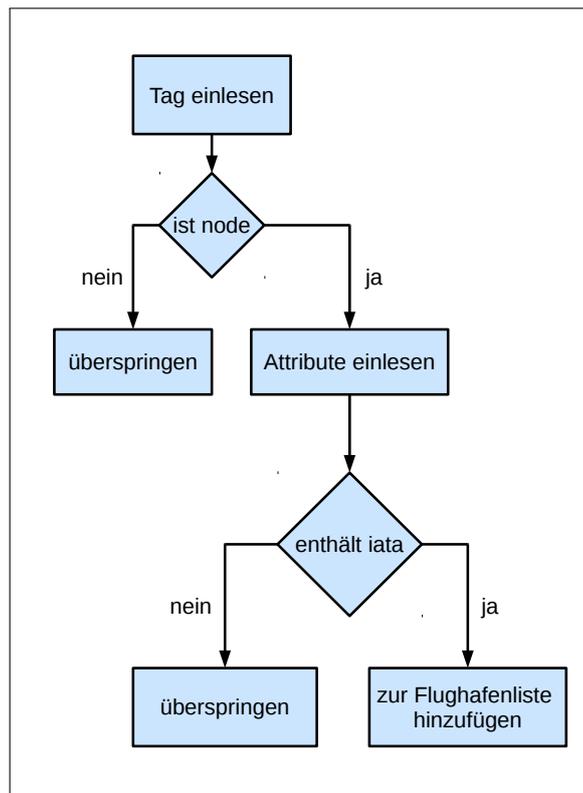


Abbildung 5.3: Prinzipskizze zur Filterung und Erstellung der Flughafenliste [Eigene Darstellung]

die Flugdauer in Sekunden umgerechnet und die Flugdistanz in Kilometer. Es folgt eine abschließende Prüfung, ob der Flug in die Datenbank aufgenommen werden soll. Hierzu werden mehrere Einträge über eine `if` Anweisung geprüft, bei positivem Ergebnis der Flug übernommen und mittels `BufferedWriter` in die Datei `oagEuroFlights` ausgeschrieben. Hierzu müssen erfüllt sein:

- Auflistung der Verkehrstage enthält 2 für Dienstag
- Flug ist nicht bereits behandelt worden
- die angebotene Sitzplatzanzahl ist größer 0
- Start- und Zielflughafen sind nicht identisch
- Start- und Zielflughafen sind beide in OSM enthalten

Ist einer der Flughäfen nicht in den OSM-Daten enthalten, wird der IATA-Code des Flughafens in die Datei `missingAirports` ausgeschrieben. Weiterhin wird eine Liste der Städtepaare (`cityPairs`) erstellt und ebenfalls ausgeschrieben. Diese wird zur Erstellung des Netzwerks benötigt und enthält lediglich die IATA-Codes des Städtepaars, die Entfernung zwischen den Flughäfen und die vereinheitlichte Flugdauer. Die OAG

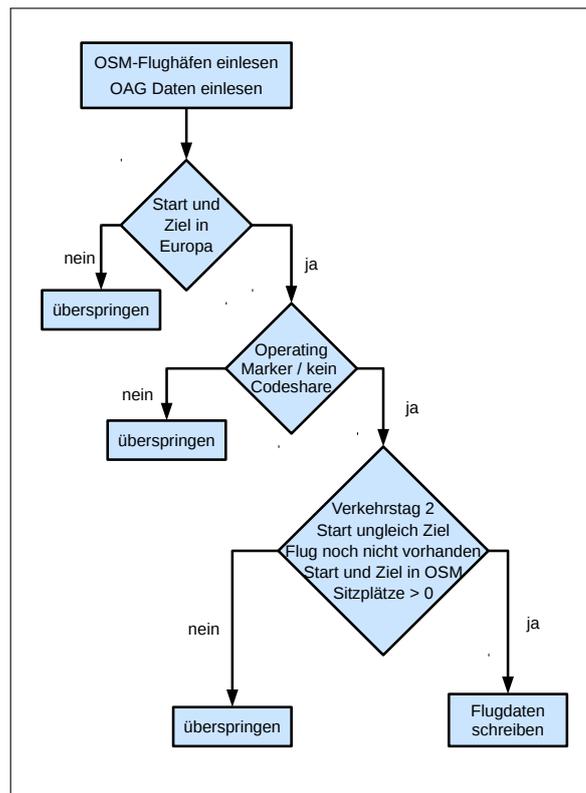


Abbildung 5.4: Prinzipskizze zur Filterung der OAG WDF Datenbank [Eigene Darstellung]

Datenbank enthält Flüge von und zu 767 europäischen Flughäfen. 305 dieser Flughäfen sind in den OSM-Daten für die Netzwerkerstellung nicht enthalten, folglich umfasst die Flughafendatenbank 462 Flughäfen. Es ergeben sich 5305 einzelne Paarungen von Start- und Zielflughafen, wobei jedes Städtepaar in dieser Zahl doppelt gezählt wurde. Die Anzahl der Flüge beläuft sich auf 15265.

Am Beispiel eines Flugs von Berlin nach Zürich sieht die Ausgabe wie folgt aus:

Route	Linie	Flugnr.	Abflug	Dauer	Flugzeugtyp	Sitze	Entfernung
TXL_ZRH	TXL_ZRH_LX	LX0967	53400.0	5100.0	320	168	659.83104

Die Route dient bei der Erstellung des Transit Schedule als Transit Route, die Linie als Transit Line und die Flugnummer als id des Flugzeugs.

5.4.3 Entwurf einer Airport-Klasse in MATSim

Um eine schnelle und unkomplizierte Erstellung von Flughäfen in MATSim zu ermöglichen wurde die Klasse `SfMatsimAirport` geschaffen. Bei der Instantiierung müssen lediglich die Id und die Koordinaten als Instanz des Typs `Coord` übergeben werden. Die Erstellung der restlichen Infrastruktur erfolgt durch ausführen der Methode `createRunways` (`Network network`), bei der das `MATSim-Network` übergeben werden muss, zu dem der Flughafen hinzugefügt werden soll. Mit `createRunways` werden die Start- und Landebahnen, die Rollbahnen (*Taxiways*) und das Flughafenvorfeld er-

stellt. Hierzu werden zunächst entsprechende **Nodes** mit den übergebenen Koordinaten erzeugt und dem **Network** hinzugefügt, wobei die Position der einzelnen **Nodes** nach einem bestimmten Muster (siehe Quelltext) verschoben wird. Im Anschluss werden die entsprechenden **Links** zwischen den **Nodes** erstellt und die erlaubten Modi (**pt**: Public Transport und **car**: Auto), die Kapazitäten (**capacity** bzw. c_{flow}), die Geschwindigkeit (**freespeed**) und die Länge definiert. Abschließend werden auch die **Links** dem **Network** hinzugefügt. Abbildung 5.2 veranschaulicht den Aufbau der Infrastruktur, die ein **SfMatsimAirport** enthält.

5.4.4 Erstellung des Netzwerks

In das zu erstellende Netzwerk fließen zwei der Ausgabedateien des **SfAirSchedule Builder** und die Klasse **SfMatsimAirport** ein. Mittels **NetworkImpl.createNetwork()** wird ein leeres Netzwerk erstellt und mit **setCapacityPeriod(1.0)** die **Capacity Period**, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, auf 1.0 gesetzt. Um das Netzwerk in der Visualisierung zu optimieren wurde die Koordinatentransformation **EPSG:3395** von **WGS84** nach **World Mercator** [67] gewählt und auf die Koordinaten der Flughäfen angewendet, nachdem diese aus der **osmEuroAirports** eingelesen wurden. Mit der **createRunways()** Methode von **SfMatsimAirport(...)** werden die benötigten Flughäfen erstellt und dem Netzwerk hinzugefügt. Aus der **cityPairs** werden der Start- und Zielflughafen, die Flugdistanz und die Flugdauer eingelesen und die entsprechenden **Links** erstellt. Die Flugdistanz wird von Kilometer in Meter konvertiert. Diese Distanz dividiert durch die Nettoflugzeit ergibt die Geschwindigkeit auf dem **Link** zwischen zwei Flughäfen. Es gilt:

$$\text{freespeed}_{\text{Link}} = \frac{\text{length}}{\text{Nettoflugzeit}}$$

Die **allowedModes** des Netzwerks werden auf **car**, **pt** festgelegt. Schließlich werden die **Links** zum Netzwerk hinzugefügt und mit einem **NetworkWriter** in die Datei **euroAirNetwork.xml** ausgeschrieben. Das erzeugte Netzwerk umfasst 5305 **Links**, die 462 Flughäfen miteinander verbinden. Zusammen mit je fünf **Links** pro Flughafen ergibt sich eine Gesamtzahl von 7615 **Links** im gesamten Netzwerk. Eine Liste der in OSM nicht vorhandenen Flughäfen befindet sich im Anhang a. Abbildung 5.5 zeigt ein deutschlandweites Luftverkehrsnetzwerk. Die Erstellung eines solchen ist möglich, indem man die Klasse **DgNet2Shape** nutzt um ein **Shapefile** des **xml**-Netzwerks erstellt und dieses im Anschluss in einem *Geographic Information System*, beispielsweise Quantum GIS, öffnet und ein entsprechendes **Shapefile** der darzustellenden Region darunter legt.

5.5 Erstellung der Eingangsdaten für die PT-Simulation

Um eine PT-Simulation in MATSim durchführen zu können, bedarf es eines Netzwerks, eines `Transit Schedules` und einer Datei mit `Vehicles`. Die Erstellung der beiden Letzteren wird mit der Klasse `SfTransitBuilder` bewerkstelligt. Die ersten Schritte sind die Erstellung eines `Scenarios`, einer `Config` und eines `Scenario Loaders`, mit denen ein neues `Scenario` erstellt und das `euroAirNetwork` ins `Scenario` geladen wird. Anschließend muss die Nutzung des PT-Moduls und von `Vehicles` in der `Scenario Config Group` aktiviert werden. Bevor die eigentliche Erstellung des `Schedules` und der `Vehicles` beginnen kann, müssen noch eine `Transit Schedule Factory`, ein leerer `Transit Schedule` und eine Implementierung von `Vehicles` erstellt werden, in die die Fahrplan- und Fahrzeugdaten geschrieben werden.

Für die Erstellung des `Transit Schedule` wird eine `Transit Route` als die Route zwischen einem Städtepaar definiert, wobei es pro Richtung eine `Transit Route` gibt. Eine `Transit Line` wird für jede Fluggesellschaft auf einem Städtepaar erstellt. Alle `Transit Lines` nutzen bei identischem Städtepaar dieselben `Transit Routes`. Für die Erstellung des `Transit Schedules` wird auf die `oagFlightSchedule`-Datei zurückgegriffen. Diese wird Zeile für Zeile eingelesen und verarbeitet. Pro Flughafen wird eine `Transit Stop Facility` auf dem `Link` des `Aprons` erstellt. Diese bekommt die `id` des Flughafens, die auch mit der `id` des `Apron Links` übereinstimmt. Im nächsten Schritt wird eine Liste der `Links` erstellt, die zwischen einem Städtepaar genutzt werden sollen. Sie ist für jede `Transit Route` identisch. Hierbei handelt es sich um die folgenden `Links` (vgl. Abbildung 5.2):

- *Outbound Taxiway*
- *Outbound Runway*
- direkte Verbindung Start-Ziel
- *Inbound Runway*
- *Inbound Taxiway*

Zur Erstellung der `Transit Route` wird eine `Network Route` benötigt, welche neben der `Link`-Liste auch den Anfangs- und End-`Link` enthält. Eine solche `Network Route` wird für jede `Transit Line` erstellt und in einer `Map` gespeichert. Ebenso wird für jede `Transit Line` eine `Transit Route` erstellt und ebenfalls in einer `Map` zwischengespeichert. Jede `Departure` wird einzeln mit Flugnummer als `id` und `Vehicle id` sowie der Abflugzeit zum `Transit Schedule` hinzugefügt. Anschließend werden die `Transit Line` und `Transit Route`, sofern diese noch nicht enthalten sind, zum `Transit Schedule` hinzugefügt. Weiterhin werden die `Vehicles` mit Informationen über den Typ

und die Kapazität erstellt und dem entsprechenden Container hinzugefügt. Mit dem `TransitScheduleWriterV1` und dem `VehicleWriterV1` werden der `Transit Schedule` und die `Vehicles` in einer `xml`-Datei gespeichert.

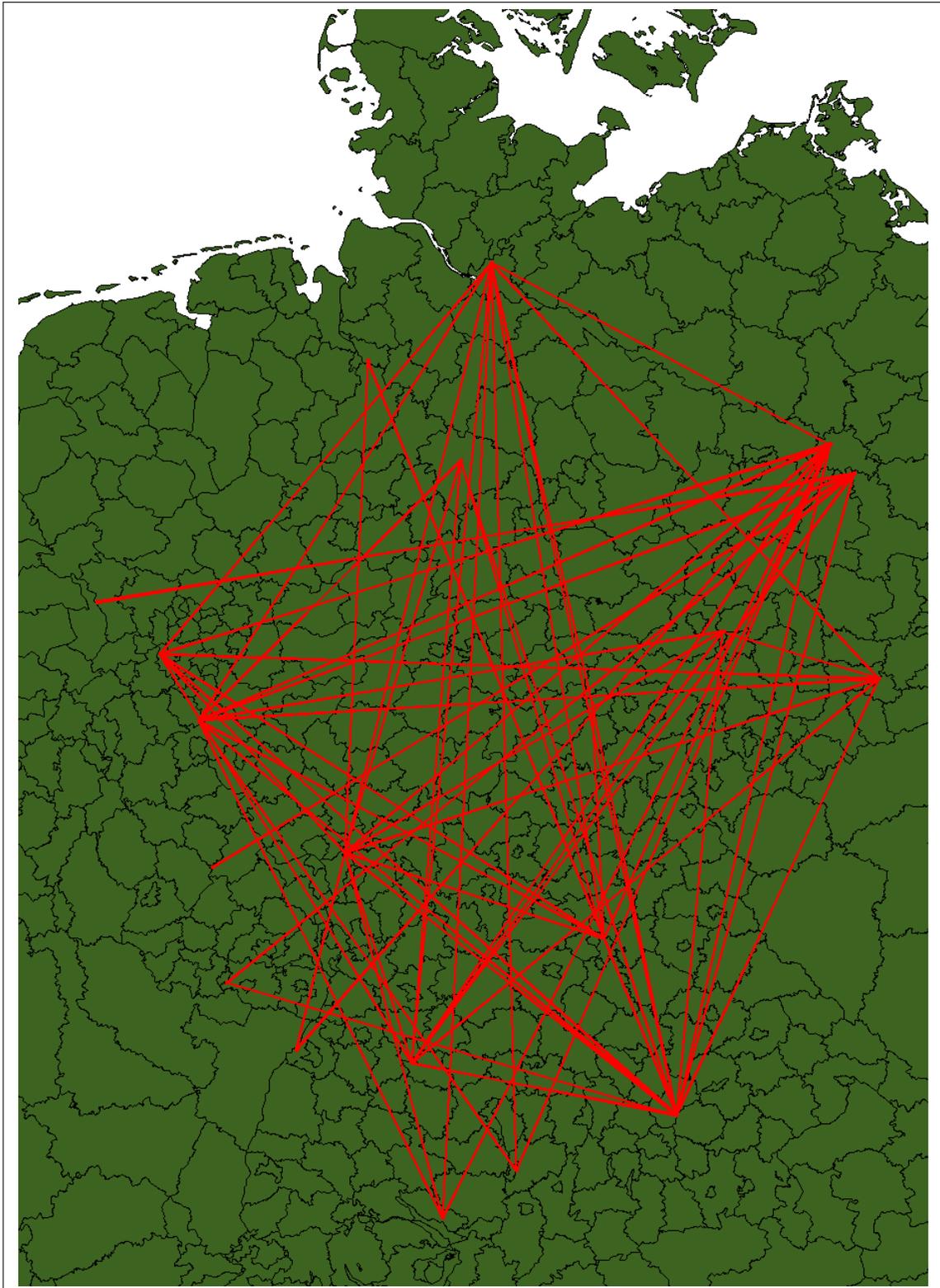


Abbildung 5.5: Deutschlandweites Luftverkehrsnetzwerk [Eigene Darstellung, erstellt mit Quantum GIS und NUTS-2006 Shapefile von Eurostat [34]]

Kapitel 6

Verkehrssimulation

Um eine Simulation mit MATSim durchzuführen, wird der *Public Transport* Ansatz von MATSim genutzt. Die Eingangsdaten umfassen das erzeugte Netzwerk, den Fahrplan inklusive der Linien und Routen, eine Liste der Fahrzeuge und die Konfigurationsdatei.

6.1 Durchführung der Simulation

Die Simulation benötigt eine Konfigurationsdatei (`config`), in der die Pfade zu den Eingangsdaten `Transit Schedule`, Netzwerk und `Vehicles` angegeben sind. In der `config` ist neben den in Abschnitt 3.2 genannten Einstellungen im Modul `controller` das `eventsFileFormat` auf `xml` zu setzen, da gegenwärtig keine anderen Formate für PT unterstützt werden.

Die Klasse `SfAirController` wurde zur Durchführung der Simulation erstellt. Es wird ein `Controller` instanziiert und im Anschluss der `SfFlightTimeControllerListener` hinzugefügt, welcher wiederum den `SfFlightTimeEventHandler` enthält. Somit wird ein *Event Handling* während der Simulation ermöglicht und `Agent Arrival Events` können ausgegeben werden, um Abweichungen der Ankunftszeit vom Flugplan zu analysieren.

Es wird lediglich ein Simulationsdurchlauf ausgeführt. Die Agenten haben durch die Struktur des Netzwerks keine Möglichkeit ihre Route zu ändern. Eine verkehrsabhängige Änderung der Abflugzeit ist ebenfalls nicht vorgesehen.

6.2 Ergebnisse der Simulation

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Verkehrssimulation des europäischen Linien-Luftverkehrs. Abbildung 6.1 zeigt die Verteilung der Abflüge, Ankünfte und Streckenflüge über den Simulationszeitraum. In den Nachtstunden finden so gut wie keine Starts

und Landungen statt. Es lassen sich eine Morgen- und eine Nachmittagsspitze erkennen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei allen Abflug- und Ankunftszeiten um Lokalzeiten handelt, was zu einer Verschiebung der Verkehrsspitzen geführt haben kann.

Die Ausgabedateien der Simulation beschränken sich auf Histogramme der durchgeführten Fahrten, eine Statistik der Ankunftszeiten, eine Datei sämtlicher `Events` und eine `mvi`-Datei, mit der die Fahrten der Agenten im Netzwerk unter Zuhilfenahme des `OTFVis`, den MATSim bereitstellt, visualisiert werden können. Derzeit bewegen sich in der Visualisierung die Agenten jeweils direkt vom Anfang eines `Links` zur Mitte und von dort direkt zum Ende. Ein Verkehrsfluss ist somit vor allem im Bereich der Flughäfen zu erkennen. Die Fahrten lassen sich auch über die `Events` nachvollziehen. Ein Beispiel ist in Anhang c zu finden.

Tabelle 6.1 zeigt die aufgetretenen Abweichungen der tatsächlichen Ankunftszeiten von der planmäßigen Ankunftszeit auf. Die Abweichungen berechnen sich aus

$$t_{\text{Abweichung}} = t_{\text{simulierteAnkunft}} - t_{\text{AnkunftnachFahrplan}}$$

woraus sich für Verspätungen ein positiver Wert und für verfrühte Ankünfte ein negativer Wert ergibt. Es trat keine Verspätung von 20 Minuten oder mehr auf. Die Gesamtzahl der verspäteten Ankünfte beläuft sich auf 1378, was etwa 9% aller Flüge entspricht. 91% der Flüge kommen vor der planmäßigen Ankunftszeit auf der Parkposition an, wobei keine Ankunft mehr als fünf Minuten vor Fahrplan erfolgt. Dieser Wert stimmt nahezu mit der Realität überein. Nach Angaben der DFS erreichten 94% aller IFR-Flüge im Jahr 2009 pünktlich ihre Destination [21, S. 36].

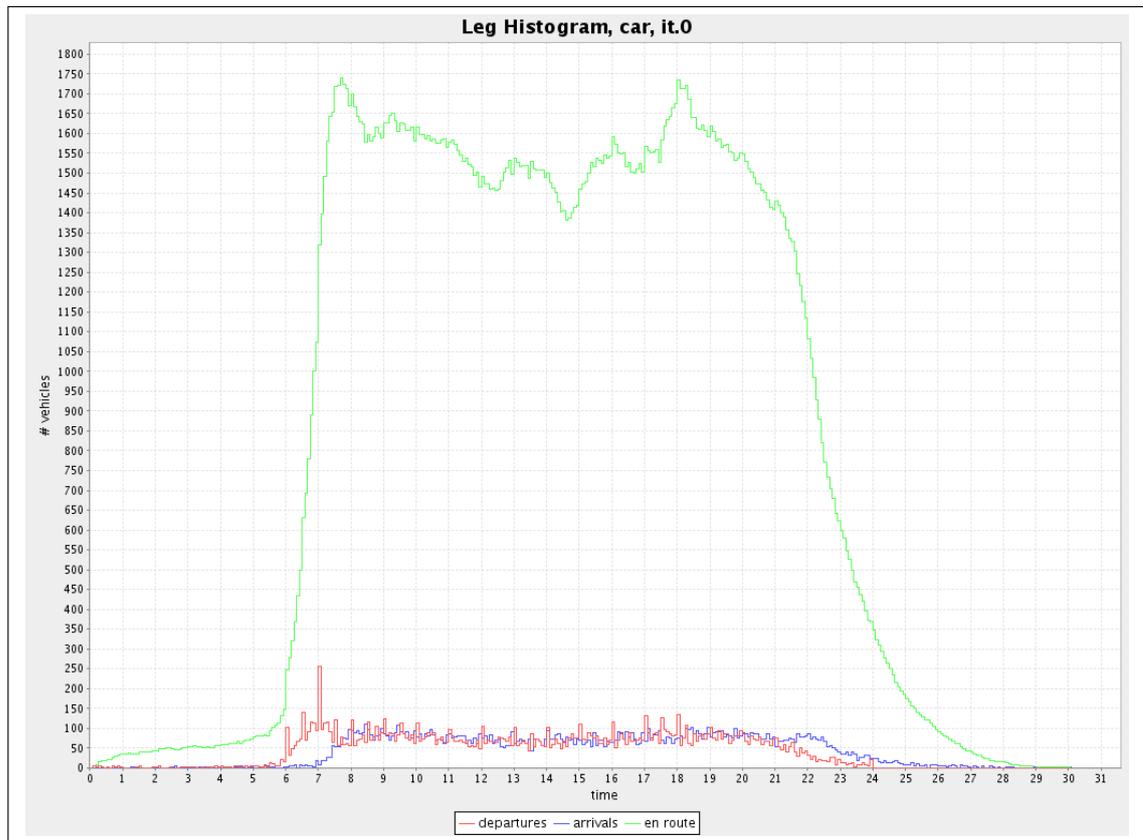


Abbildung 6.1: Histogramm aller Abflüge, Landungen und Streckenfüge der Simulation.
[Ausgabe des Controllers nach Durchführung der Simulation]

Abweichung (<i>min</i>)	Anzahl der Abweichungen
größer oder gleich -5	0
kleiner als -5	7065
kleiner als -4	3581
kleiner als -3	1230
kleiner als -2	1323
kleiner als -1	688
fahrplangenau	0
kleiner als 1	296
kleiner als 2	267
kleiner als 3	205
kleiner als 4	115
kleiner als 5	123
kleiner als 10	285
kleiner als 15	71
kleiner als 20	16
größer oder gleich 20	0

Tabelle 6.1: Abweichung der Ankunftszeit in der Simulation von der Ankunftszeit nach Fahrplan [Eigene Darstellung]

Kapitel 7

Diskussion und Ausblick

Die Möglichkeit, den europäischen Linien-Luftverkehr mit MATSim zu modellieren, wurde durch die realistische Verschiebung der Ankunftszeiten nachgewiesen. Die zahlreichen Vereinfachungen zur Modellierung des komplexen Systems Luftverkehr bieten Potential für Verbesserungen.

Da insgesamt 15625 Flüge simuliert wurden, ist eine signifikante Zahl von bis zu 10000 Flügen nicht in der Simulation enthalten (vgl. Abschnitt 2.7.2). Dies könnte zu einer Verfälschung der Ergebnisse in Bezug auf Verspätungen beigetragen haben. Auch die Ausprägung der Verkehrsspitzen ist hierdurch möglicherweise abgeschwächt worden. Um valide Aussagen für den gesamten Linien-Luftverkehr treffen zu können ist eine Vervollständigung der Datenbanken nötig.

Der implementierte Simulationsansatz führt lediglich eine Verkehrsflussimulation mit leeren Flugzeugen durch. Die Simulation lässt folglich keine Rückschlüsse auf Verkehrsströme zu. Um eine Luftverkehrsnachfrage zu simulieren, muss zunächst eine Population erzeugt werden. Anschließend kann eine Nachfrage generiert werden. Wie dies im Detail umgesetzt werden kann, ist in der Zukunft zu prüfen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob eine multi-modale Simulation unter Einbeziehung des Luftverkehrs möglich ist. Strukturell unterscheidet sich das Luftverkehrsnetzwerk in MATSim nicht wesentlich von einem Straßennetzwerk. Eine Anbindung anderer Verkehrsträger an das Luftverkehrsnetz ist nach Meinung des Autors möglich.

Bei der Erstellung des `TransitSchedule` wird bisher von einem einzigen Verkehrstag ausgegangen. Es ist zu beachten, dass an anderen Verkehrstagen eine Anzahl von Routen bedient wird, die an einem Dienstag möglicherweise nicht geflogen werden. Auch kommt es vor, dass bestimmte Städtepaare an einem Verkehrstag nur in eine Richtung bedient werden und der Rückflug an einem anderen Tag erfolgt. Weiterhin ist bei Flugplänen auch innerhalb einer Flugplanperiode die Gültigkeit zu beachten. So

kann es vorkommen, dass ein Flug in einer bestimmten Woche zu anderen Zeiten und unter einer anderen Flugnummer durchgeführt wird als in der Woche darauf. Werden diese Einträge nicht herausgefiltert, entstehen möglicherweise unbeabsichtigt doppelte Einträge für ansonsten identische Flüge.

Um eine realistische Verteilung der Flüge über den Tag zu gewährleisten, müssten auch die Abflugzeiten von Lokalzeit der unterschiedlichen Zeitzonen in Europa in eine einheitliche Zeitzone umgerechnet werden. Unter den hier modellierten Voraussetzungen kommt es zu einer Verschiebung von zahlreichen Flugbewegungen um mindestens eine Stunde. So liegt zum Beispiel der europaweit verkehrsreichste Flughafen *London-Heathrow* in einer anderen Zeitzone als die auf die folgenden Plätzen rangierenden Drehkreuze *Paris Charles de Gaulle* und Frankfurt Rhein-Main.

Die Modellierung des Luftverkehrsnetzes als *non-stop* Verbindungen direkt zwischen zwei Städten weicht stark von der Realität ab. Um eine Verkehrsflusssimulation durchzuführen, bei der nicht nur die Start- und Landebahnen kapazitätsbeschränkend wirken, ist es sinnvoll eine Art ATS-Routennetz zu erstellen. In der Praxis wird heutzutage viel mit sogenannten *direct-to Routings* gearbeitet, sodass das ATS-Routennetz vor allem für die Routenberechnung und die Flugplanaufgabe genutzt wird, während im Reiseflug je nach Auslastung der verschiedenen ATC-Sektoren oft komplett andere Routen abgeflogen werden. Es müsste ermittelt werden, ob die Erstellung eines ATS-Routennetzes unter diesen Umständen sinnvoll ist, oder ob eine andere Art der Modellierung eine bessere Möglichkeit darstellen könnte.

Im bisherigen Netzwerk wird die Fluggeschwindigkeit durch die in der Flugdatenbank gegebenen Flugzeit und der Flugdistanz für jede Strecke berechnet. Hierdurch entstehen je nach Streckenlänge erhebliche Differenzen der Fluggeschwindigkeiten im Netzwerk. Bei der Erzeugung eines Netzwerks, welches nicht nur aus Direktverbindungen besteht, müsste an dieser Stelle eine weitere Vereinheitlichung und Vereinfachung getroffen werden. Eine Alternative zu einem Netzwerk mit festgelegten Geschwindigkeiten könnte die Verlagerung des **freespeed** in die Fahrzeugimplemetierung darstellen. Dies würde den unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten der verschiedenen Flugzeugtypen Rechnung tragen.

Kapazitätsbeschränkungen der Flughäfen sind in diesem Ansatz ebenfalls stark vereinfacht und pauschalisiert, während sie sich in der Realität von Flughafen zu Flughafen deutlich unterscheiden können. Dies liegt einerseits an der Kapazität des Luftraums und der Start- und Landebahnssysteme, andererseits sind Kapazitätsengpässe auch im Bereich der *Taxiways* zu beobachten [13, S. 29ff]. Eine Zuweisung unterschiedlicher Kapazitäten, die sich stärker an der Realität orientiert, ist im Fall großer Flughäfen

mindestens für Start- und Landebahnen als sinnvoll zu betrachten. Als Kriterium könnte beispielsweise die Anzahl der Start- und Landebahnen dienen. Ebenso könnte die tatsächliche Anzahl der Flugbewegungen herangezogen werden. Eine Ausweitung auf Flughäfen, die nicht nahe Kapazitätsgrenze operieren ist nur bei geringem Aufwand als sinnvoll zu bewerten.

Die genannten Argumente zeigen einerseits auf, dass für eine wirklichkeitsnahe Simulation des Luftverkehrs Nachholbedarf besteht. Die Abbildung von Verkehrsspitzen und die aufgetretenen Verspätungen zeigen jedoch, dass valide Annahmen getroffen wurden. Andererseits wird nach Ansicht des Autors deshalb die Eignung des in dieser Arbeit entworfenen Ansatzes als Basis für eine Erweiterung deutlich.

Literaturverzeichnis

- [1] ABERLE, G. : *Transportwirtschaft*. 5. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [2] AIRBUS S.A.S.: *Global Market Forecast 2010-2029*. [Online]. <http://www.airbus.com/company/market/gmf2010/>. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [3] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER FLUGHÄFEN (ADV): *ADV Monatsstatistik*. [Online]. http://www.adv.aero/fileadmin/pdf/statistiken/2010/ADV-Okttober_2010.pdf. Version: Oktober 2010. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [4] ASSOCIATION OF EUROPEAN AIRLINES (AEA): *Member Airlines*. [Online]. <http://www.aea.be/about/memberairlines/index.html>. – letzter Zugriff: 11.01.2011.
- [5] BOEING: *Current Market Outlook 2010-2029*. [Online]. <http://www.boeing.com/commercial/cmo/>. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [6] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland (GG)*. [Online]. <http://www.gesetze-im-internet.de/gg/>. Version: Juli 2010. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [7] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)*. [Online]. <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvo/>. Version: Januar 2010. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [8] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO)*. [Online]. <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvzo/>. Version: Januar 2010. – letzter Zugriff: 11.01.2011.
- [9] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: *Luftverkehrsgesetz (LuftVG)*. [Online]. <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvg/>. Version: August 2010. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [10] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS): *Organisation der Luftverkehrsverwaltung*. [Online]. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/LR/>

- organisation-der-luftverkehrsverwaltung.html?nn=35602. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS) (HRSG.) ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (DIW) (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2009/2010*. Hamburg: DVV Media Group, 2009
- [12] BUNDESSTELLE FÜR FLUGUNFALLUNTERSUCHUNG (BFU): *Aufgaben der BFU*. [Online]. http://www.bfu-web.de/cln_005/nn_224142/DE/BFU/Aufgaben/aufgaben__node.html?__nnn=true. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [13] BUSACKER, T. : *Steigerung der Flughafen-Kapazität durch Modellierung und Optimierung von Flughafen-Boden-Rollverkehr – Ein Beitrag zu einem künftigen Rollführungssystem (A-SMGCS)*, Technische Universität Berlin - Institut für Luft- und Raumfahrt - Fachgebiet für Flugführung und Luftverkehr, Dissertation, 2004. www.ff.tu-berlin.de/uploads/media/busacker_torsten.pdf
- [14] DEUTSCHE EMISSIONSHANDELSSTELLE (DEHST): *Fact Sheet: Emissionshandel im Luftverkehr*. [Online]. http://www.dehst.de/cln_153/SharedDocs/Downloads/Publikationen__DE/Fact__Sheet__Luftverkehr,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Fact_Sheet_Luftverkehr.pdf. Version: September 2010. – letzter Zugriff: 08.02.2011.
- [15] DEUTSCHE LUFTHANSA AG: *Online Flugplan*. [Online]. <http://www.lufthansa.com/de/de/Online-Flugplan>. – letzter Zugriff: 13.01.2011.
- [16] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD): *Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes*. [Online]. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_aufgabenspektrum&nfls=false
- [17] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, A. : *Low Cost Monitor 1/2010*. [Online]. http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resourcen/portal_news/newsarchiv2010_3/Low_Cost_Monitor_I_2010_final.pdf. Version: 2010. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [18] DFS DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *Grundkurs Flugsicherung*. [Online]. http://www.dfs.de/dfs/internet_2008/module/grundkurs_flugsicherung/deutsch/grundkurs_flugsicherung/system_flugsicherung/index.html. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [19] DFS DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *Luftraumstruktur als Poster*. [Online]. http://www.dfs.de/dfs/internet_2008/module/grundkurs_flugsicherung/deutsch/grundkurs_flugsicherung/system_flugsicherung/luftrauminfo_struktur/luftraumplakat.pdf. – letzter Zugriff: 12.01.2011.

- [20] DFS DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *7,1 Prozent weniger Flüge im deutschen Luftraum*. [Online]. http://www.dfs.de/dfs/internet_2008/module/presse/deutsch/presse/presseinformation/2010/7_1_prozent_weniger_fluege_im_deutschen_luftraum_5_3/index.html. Version: März 2010. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [21] DFS DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *Mobilitätsbericht 2009*. [Online]. http://www.dfs.de/dfs/internet_2008/module/presse/dfs_mobilitaetsbericht_2009_de.pdf. Version: Februar 2010. – letzter Zugriff: 26.02.2011.
- [22] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 3166-1. Codes für die Namen von Ländern und deren Untereinheiten - Teil 1: Codes für Ländernamen (ISO 3166-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 3166-1:2006*. Berlin: März 2007.
- [23] EDMO-FLUGBETRIEB GMBH: *Flughafen*. [Online]. <http://www.edmo-airport.de/Seiten/Flughafen.html>. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [24] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *About us*. [Online]. http://www.eurocontrol.int/corporate/public/standard_page/lp_about_us.html. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [25] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *CFMU Access Eligibility and Rules*. [Online]. http://www.cfm.eurocontrol.int/cfm/public/standard_page/services_and_support_service_eligibility_rules.html. – letzter Zugriff: 11.01.2011.
- [26] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *CFMU Newsletter July 2010*. [Online]. http://www.cfm.eurocontrol.int/cfm/gallery/content/public/newsletters/cfm_news1_03_final_web.pdf. – letzter Zugriff: 11.01.2011.
- [27] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *EAD Basic*. [Online]. <http://www.ead.eurocontrol.int/eadcms/eadsite/index.php.html>. – letzter Zugriff: 02.02.2011.
- [28] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *40 years of service to European aviation*. [Online]. <http://www.eurocontrol.int/corporate/gallery/content/public/docs/pdf/aboutus/history.pdf>. Version: 2003. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [29] EUROCONTROL - EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION: *EUROCONTROL Medium-Term Forecast: IFR Flight*

- Movements 2010-2016*. [Online]. <http://www.eurocontrol.int/statfor/gallery/content/public/forecasts/Doc404-MT-Flights-Sep10-v1.0.pdf>.
Version: September 2010. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [30] EUROPA.EU - GATEWAY TO THE EUROPEAN UNION: *European Countries*. [Online]. http://europa.eu/abc/european_countries/. – letzter Zugriff: 10.02.2011.
- [31] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *Generic - Frequently Asked Questions (FAQ)*. [Online]. <http://easa.europa.eu/frequently-asked-questions.php>. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [32] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *Home - Europäische Agentur für Flugsicherheit*. [Online]. <http://easa.europa.eu/language/de/home.php>. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [33] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *Regulations structure*. [Online]. <http://easa.europa.eu/regulations/regulations-structure.php>. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [34] EUROPÄISCHE KOMMISSION - EUROSTAT: *Verwaltungseinheiten/Statistische Einheiten*. [Online]. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco/popups/references/administrative_units_statistical_units_1. – letzter Zugriff: 02.03.2011.
- [35] EUROPÄISCHEN UNION, A. der: *Verordnung (EG) Nr. 1008/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates*. [Online]. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:293:0003:0020:DE:PDF>.
Version: Oktober 2008. – letzter Zugriff: 02.03.2011.
- [36] FÜRBAAS, S. : *MATSim Playground fuerbas*. [Online]. <https://matsim.svn.sourceforge.net/svnroot/matsim/playgrounds/trunk/fuerbas/>
- [37] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Intelligence & Statistics Solutions*. [Online]. http://www.iata.org/ps/intelligence_statistics/Pages/index.aspx. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [38] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Membership Airlines*. [Online]. <http://www.iata.org/membership/Pages/airlines.aspx>. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [39] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Schedules Conference*. [Online]. <http://www.iata.org/whatwedo/passenger/scheduling/Pages/conference.aspx>. – letzter Zugriff: 10.01.2011.

- [40] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *IATA Environmental Review 2004*. [Online]. <http://www.iata.org/ps/publications/9486.htm>. Version: September 2004. – letzter Zugriff: 02.01.2011.
- [41] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Industry Financial Forecast*. [Online]. <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/Industry-Outlook-Dec-10.pdf>. Version: Dezember 2010. – letzter Zugriff: 09.02.2011.
- [42] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *International Air Transport Association Annual Report 2010*. [Online]. <http://www.iata.org/pressroom/Documents/IATAAnnualReport2010.pdf>. Version: 2010. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [43] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *ICAO Contracting States*. [Online]. <http://www.icao.int/cgi/statesdb4.pl?en>. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [44] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *Statistical Publications produced by the International Civil Aviation Organization*. [Online]. <http://www.icao.int/icao/en/atb/sea/publications.htm>. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [45] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *Convention on International Civil Aviation*. [Online]. http://www.icao.int/icaonet/arch/doc/7300/7300_9ed.pdf. Version: 2006. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [46] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation - Aerodromes - Volume I: Aerodrome Design and Operations*. [Online]. <http://dcaa.slv.dk:8000/icaodocs/Annex%2014%20-%20Aerodromes/Annex%2014%20Volume%201,%20Aerodrome%20Design%20and%20Operations%20-%20Edition%20no%205.pdf>. Version: Juli 2009
- [47] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *Annual Report of the Council*. [Online]. http://www.icao.int/icaonet/dcs/9921/9921_en.pdf. Version: 2009. – letzter Zugriff: 10.01.2011.
- [48] INTRAPLAN CONSULT GMBH UND BERATERGRUPPE VERKEHR + UMWELT GMBH: *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. [Online]. http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/03/FE_96_857_2005_Verflechtungsprognose_2025_Gesamtbericht_20071114.pdf
- [49] KVS: *KVS Tool User Guide & FAQ*. [Online]. <http://www.kvstool.com/FAQ.php?Source=HOME>. – letzter Zugriff: 13.01.2011.

- [50] LUFTFAHRT-BUNDESAMT (LBA): *Aufgaben und Ziele des Luftfahrt-Bundesamtes*. [Online]. http://www.lba.de/cln_010/DE/LBA/Aufgaben/Aufgaben_node.html. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [51] LUFTHANSA SYSTEMS AG: *Glossar - Lufthansa Systems*. [Online]. <http://www.lhsystems.de/media/glossary/index.htm#G>. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [52] MANFRED DIEROFF UND DFS DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *Endziel Galileo (?) - Navigationsplanung und Anwendungen bei der Flugsicherung*. [Online]. http://www.akl.tu-darmstadt.de/media/arbeitskreis_luftverkehr/downloads_6/kolloquien/10kolloquium/dieroffendzielgalileonavigationsplanungundanwendungbeiderfluigsicherung.pdf. – letzter Zugriff: 27.02.2011.
- [53] MATSIM.ORG: *MATSim Features*. [Online]. <http://matsim.org/features>. – letzter Zugriff: 12.02.2011.
- [54] MATSIM.ORG: *MATSim Network DTD*. [Online]. http://matsim.org/files/dtd/network_v1.dtd. – letzter Zugriff: 02.03.2011.
- [55] MATSIM.ORG: *Simulation of Public Transport*. [Online]. <http://www.matsim.org/docs/tutorials/transit>. – letzter Zugriff: 13.02.2011.
- [56] MENSEN, H. : *Moderne Flugsicherung*. 3. Auflage. Berlin (u.a.): Springer-Verlag, 2004
- [57] MENSEN, H. : *Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen*. 1. Auflage. Berlin (u.a.): Springer-Verlag, 2007
- [58] NEUE ZÜRCHER ZEITUNG AG: *Am Himmel gibt es keinen Stau*. [Online]. http://www.nzz.ch/nachrichten/politik/schweiz/am_himmel_gibt_es_keinen_stau_1.793853.html. – letzter Zugriff: 02.03.2011.
- [59] NEUMANN, A. : *Modellierung und Evaluation von Lichtsignalanlagen in Queue-Simulationen*, Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Diplomarbeit, Berlin: 2008
- [60] OAG AVIATION: *OAG Aviation World Direct Flights (WDF) - Schedules Data*. [Online]. <http://www.oagaviation.com/Solutions/Aviation-Data/OAG-Schedules-Data/OAG-WDF>. – letzter Zugriff: 13.01.2001.
- [61] OPENSTREETMAP: *OpenStreetMap Wiki Hauptseite*. [Online]. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Hauptseite>

- [62] OPENSTREETMAP: *Xapi - OpenStreetMap Wiki*. [Online]. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/XAPI>. – letzter Zugriff: 13.02.2011.
- [63] POMPL, W.: *Luftverkehr. Eine ökonomische und politische Einführung*. 5. Auflage. Berlin (u.a.): Springer-Verlag, 2006
- [64] REN, F.: *TYPO3 Extension Repository - Static info tables - Airports*. [Online]. http://typo3.org/extensions/repository/view/static_info_tables_airports/current/. Version: Januar 2003. – letzter Zugriff: 27.02.2011.
- [65] RIESER, M.: *Adding transit to an agent-based transportation simulation concepts and implementation*, Technische Universität Berlin, Diss., 2010. – auch VSP WP 10-05, siehe www.vsp.tu-berlin.de
- [66] RYANAIR LTD.: *Flugpläne*. [Online]. <http://www.ryanair.com/de/flugplaene>. – letzter Zugriff: 12.01.2011.
- [67] SPATIALREFERENCE.ORG: *EPSG Projection 3395 - WGS 84 / World Mercator*. [Online]. <http://spatialreference.org/ref/epsg/3395/>. – letzter Zugriff: 23.02.2011.
- [68] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *destatis Publikationsservice*. [Online]. <https://www-ec.destatis.de/>. – letzter Zugriff: 11.01.2011.
- [69] STERZENBACH, RUEDIGER UND CONRADY, ROLAND UND FICHERT, FRANK: *Luftverkehr. Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch*. 4. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [70] VOIGT, F.: *Verkehr. Die Theorie der Verkehrswirtschaft*. Bd. 1. Berlin: Duncker & Humblot GmbH, 1973

Abbildungsverzeichnis

2.1	Luftraumstruktur der Bundesrepublik Deutschland	15
3.1	Die drei Abschnitte Vorbereitung, Iteration und Nachbereitung beschreiben den Ablauf einer MATSim-Simulation. Diese Arbeit befasst sich schwerpunktmäßig mit der Vorbereitung [59, S. 18].	22
5.1	Schematische Darstellung der Verbindung Berlin-Zürich mit je einem direkten Link zwischen Start- und Ziel für beide Flugrichtungen und vereinfachter Flughafeninfrastruktur bestehend aus Start- und Landebahn sowie einem <i>Taxiway</i> [Eigene Darstellung]	39
5.2	Prinzipskizze der Flughafeninfrastruktur [Eigene Darstellung]	40
5.3	Prinzipskizze zur Filterung und Erstellung der Flughafendatenbank [Eigene Darstellung]	42
5.4	Prinzipskizze zur Filterung der OAG WDF Datenbank [Eigene Darstellung]	43
5.5	Deutschlandweites Luftverkehrsnetzwerk [Eigene Darstellung, erstellt mit Quantum GIS und NUTS-2006 Shapefile von Eurostat [34]]	47
6.1	Histogramm aller Abflüge, Landungen und Streckenflüge der Simulation. [Ausgabe des Controlers nach Durchführung der Simulation]	50

Tabellenverzeichnis

2.1	Anteile der einzelnen Verkehrsträger am Verkehrsaufkommen und der Verkehrsleistung in Deutschland im Jahr 2008 [11, Eigene Darstellung, vgl. S. 218f und S. 222f]	7
6.1	Abweichung der Ankunftszeit in der Simulation von der Ankunftszeit nach Fahrplan [Eigene Darstellung]	50

Kapitel A

Anhang

a Nicht in OSM enthaltene Flughäfen (europaweit)

- AAQ • BLQ • CND • EOJ • HER
- ACS • BNX • COL • ETZ • HFS
- ADF • BOD • CQM • EVN • HOH
- AER • BRN • CRL • EZV • HRK
- AGF • BTZ • CRV • FAO • IAA
- AJA • BUS • CSH • FMO • IAR
- AKX • BVA • CTA • FNI • IAS
- AMV • BVV • CVU • FOG • IJK
- ANG • BWE • CYX • FSC • IKS
- ANK • BWK • DEB • GDN • ILZ
- ANR • BYR • DEE • GLO • INI
- AOI • BZG • DND • GMZ • IOM
- ARW • BZK • DTM • GNY • IRM
- AUR • BZO • DYR • GOJ • IVL
- BAY • BZR • EBA • GOZ • IWA
- BBS • CBG • EBU • GPA • JER
- BBU • CCF • ECN • GRQ • JIK
- BES • CEG • EEM • GRV • JKH
- BFS • CFE • EEP • GRW • JKL
- BHD • CFR • EER • GRZ • JSY
- BIA • CIA • EIE • GWT • JTY
- BIQ • CKH • EIK • HAU • JYV
- BKA • CKZ • EIN • HBZ • KAO
- BLK • CLY • ENS • HDF • KEM

• KGF	• LPI	• NOJ	• POZ	• SEN
• KHE	• LPK	• NUX	• PSR	• SIP
• KHV	• LPX	• NVR	• PUF	• SJY
• KKQ	• LRT	• NWI	• PWQ	• SKU
• KLU	• LTQ	• NYA	• PXO	• SMA
• KLV	• LTT	• NYM	• QDH	• SNR
• KRF	• LWN	• OBZ	• QJZ	• SOB
• KRK	• LYC	• OHH	• QLQ	• SOF
• KSJ	• LYX	• OMO	• QQS	• SOY
• KSN	• MCM	• OPO	• QSR	• SPL
• KSO	• MCX	• OSI	• QWB	• STW
• KSZ	• MEH	• OST	• QXG	• SUF
• KUT	• MHG	• OSW	• RDZ	• SVO
• KVK	• MJT	• OVB	• REG	• SWK
• KVR	• MLH	• OVS	• RET	• SXB
• KXK	• MMX	• OXF	• RIX	• SXL
• KZN	• MQF	• PAD	• RKE	• SZG
• LAI	• MSE	• PDV	• RLG	• TAY
• LBC	• MST	• PEE	• RMI	• TBS
• LDE	• MXX	• PEG	• RNS	• TKU
• LDG	• MZH	• PES	• ROV	• TLY
• LEH	• NAJ	• PEZ	• RTM	• TPS
• LEN	• NCY	• PGX	• RTW	• TQL
• LJU	• NER	• PLX	• SBK	• TQR
• LMP	• NGK	• PMF	• SCN	• TSF
• LNZ	• NLV	• PNL	• SCO	• TSO

- TUF
- TZL
- UCT
- UIP
- ULY
- URE
- URS
- UUA
- VAR
- VDE
- VGO
- VIC
- VIT
- VKO
- VLL
- VLY
- VOL
- VRK
- VSG
- WAT
- WRY
- XCR
- XDB
- XED
- XER
- XFF
- XFP
- XFR
- XHK
- XIZ
- XNC
- XOJ
- XOP
- XPG
- XPJ
- XQA
- XQE
- XRF
- XSH
- XUT
- XWG
- XYD
- XZI
- XZN
- XZV
- XZZ
- YMK
- ZEP
- ZFJ
- ZFQ
- ZLN
- ZLS
- ZYN
- ZYR
- ZYZ

b Nicht in OSM enthaltene Flughäfen (Deutschland)

- BWE
- DTM
- FMO
- GWT
- HBZ
- HDF
- IGS
- LBC
- MHG
- OBZ
- PAD
- RLG
- SCN

c Exemplarischer Ablauf anhand von Events: Flug LX0967 von Berlin nach Zürich

```
<event time="53400.0" type="TransitDriverStarts" driverId=
"pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX" vehicleId="LX0967" transitLineId="TXL_ZRH_LX"
transitRouteId="TXLZRH" departureId="LX0967" />

<event time="53400.0" type="departure" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXL" legMode="car" />

<event time="53400.0" type="wait2link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXL" />

<event time="53400.0" type="VehicleArrivesAtFacility" vehicle="LX0967"
facility="TXL" delay="0.0" />

<event time="53400.0" type="VehicleDepartsAtFacility" vehicle="LX0967"
facility="TXL" delay="0.0" />

<event time="53401.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXL" />

<event time="53401.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLtaxiOutbound" />

<event time="53492.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLtaxiOutbound" />

<event time="53492.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLrunwayOutbound" />

<event time="53514.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLrunwayOutbound" />

<event time="53514.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLZRH" />

<event time="58015.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="TXLZRH" />

<event time="58015.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
link="ZRHrunwayInbound" />

<event time="58040.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"
```

```
link="ZRHrunwayInbound" />
```

```
<event time="58040.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"  
link="ZRHtaxiInbound" />
```

```
<event time="58131.0" type="left link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"  
link="ZRHtaxiInbound" />
```

```
<event time="58131.0" type="entered link" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"  
link="ZRH" />
```

```
<event time="58221.0" type="VehicleArrivesAtFacility" vehicle="LX0967"  
facility="ZRH" delay="4821.0" />
```

```
<event time="58221.0" type="VehicleDepartsAtFacility" vehicle="LX0967"  
facility="ZRH" delay="4821.0" />
```

```
<event time="58221.0" type="arrival" person="pt_LX0967_line_TXL_ZRH_LX"  
link="ZRH" legMode="car" />
```